

**ASSE VIARIO MARCHE-UMBRIA  
E QUADRILATERO DI PENETRAZIONE INTERNA  
MAXI LOTTO 2**

LAVORI DI COMPLETAMENTO DELLA DIRETTRICE PERUGIA ANCONA:  
SS. 318 DI "VALFABBRICA", TRATTO PIANELLO - VALFABBRICA  
SS. 76 "VAL D'ESINO", TRATTI FOSSATO VICO - CANCELLI E ALBACINA - SERRA SAN QUIRICO  
"PEDEMONTANA DELLE MARCHE", TRATTO FABRIANO-MUCCIA-SFERCIA.

**PROGETTO ESECUTIVO**

<b>CONTRAENTE GENERALE:</b>	<i>Il responsabile del Contraente Generale:</i>	<i>Il responsabile Integrazioni delle Prestazioni Specialistiche:</i>
	Ing. Federico Montanari	Ing. Salvatore Lieto

**PROGETTAZIONE: Associazione Temporanea di Imprese**

Mandataria: **PROGETTAZIONE GRANDI INFRASTRUTTURE PROGIN S.p.A.** Mandanti: **LOMBARDI SA INGEGNERI CONSULENTI** **LOMBARDI-REICO INGEGNERIA S.r.l.** **SGAI s.r.l. di E.Forlani & C.** Studio di Ingegneria e Geologia Applicata  
Via Marconi, 20 - 47832 Montano di Romagna (RN) - ITALY  
P. IVA: 0198420463 - tel: +39 0541985277 - e-mail: sgai@sgai.com pec: sgai@sgai.pec.com [www.sgai.com](http://www.sgai.com) Sist. Qual. Qual. ISO 9001:08/RNA-487008

RESPONSABILE DELLA PROGETTAZIONE PER L'A.T.I. Prof. Ing. Antonio Grimaldi GEOLOGO Dott. Geol. Fabrizio Pontoni COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE Ing. Michele Curiale	  
--	--

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO		
Ing. Giulio Petrizzelli		

<b>2.1.2 - PEDEMONTANA DELLE MARCHE</b> <b>Secondo stralcio funzionale: Matelica Nord - Matelica sud/Castelraimondo nord</b>  <b>OPERE D'ARTE MAGGIORI : GALLERIE NATURALI</b> <b>GALLERIA "CROCE DI CALLE"</b> <b>Relazione tecnica di calcolo - Parte 2</b>	<b>SCALA:</b> -  <b>DATA:</b> <b>Luglio 2017</b>
--	--

Codice Unico di Progetto (CUP) **F12C03000050021** (Assegnato CIPE 23-12-2015)

Codice elaborato:

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc.	N. prog.	Rev.
L 0 7 0 3	2 1 2	E	1 4	G N 3 2 0 0	R E L	0 5	A

REV.	DATA	DESCRIZIONE	Redatto		Controllato	Approvato
A	Luglio 2017	EMISSIONE	PROGIN	PROGIN	S.LIETO	A. GRIMALDI

**ASSE VIARIO MARCHE – UMBRIA E QUADRILATERO DI  
PENETRAZIONE INTERNA**

**MAXI LOTTO 2**

*Pedemontana delle Marche*

*Secondo Lotto funzionale –Matelica Nord – Castelraimondo Nord*

**GALLERIA CROCE DI CALLE**

**RELAZIONE TECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE**

**PARTE 2**

## INDICE

<b>1. VERIFICA SEZIONE TIPO - COPERTURA <math>80 &lt; H &lt; 110</math> M</b> .....	<b>5</b>
1.1 SEZIONE TIPO B2* – PARAMETRI DI RESISTENZA MASSIMI .....	5
1.1.1 <i>Fasi di calcolo</i> .....	10
1.1.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti .....	12
1.1.1.1.1 Rivestimento di prima fase .....	12
1.1.1.1.2 Rivestimento definitivo.....	15
<b>2. VERIFICA SEZIONE TIPO - COPERTURA <math>50 &lt; H &lt; 80</math> M</b> .....	<b>23</b>
2.1 SEZIONE TIPO B2 – PARAMETRI DI RESISTENZA MINIMI.....	23
2.1.1 <i>Fasi di calcolo</i> .....	28
2.1.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti .....	30
2.1.1.1.1 Rivestimento di prima fase .....	30
2.1.1.1.2 Rivestimento definitivo.....	32
2.2 SEZIONE TIPO B2 – PARAMETRI DI RESISTENZA MASSIMI.....	39
2.2.1 <i>Fasi di calcolo</i> .....	43
2.2.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti .....	45
2.2.1.1.1 Rivestimento di prima fase .....	45
2.2.1.1.2 Rivestimento definitivo.....	47
2.3 SEZIONE TIPO B0 – PARAMETRI DI RESISTENZA MASSIMI.....	56
2.3.1 <i>Fasi di calcolo</i> .....	60
2.3.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti .....	62
2.3.1.1.1 Rivestimento di prima fase .....	62
2.3.1.1.2 Rivestimento definitivo.....	64
2.4 SEZIONE TIPO PIAZZOLA – PARAMETRI DI RESISTENZA MINIMI .....	72
2.4.1 <i>Fasi di calcolo</i> .....	76
2.4.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti .....	79
2.4.1.1.1 Rivestimento di prima fase .....	79
2.4.1.1.2 Rivestimento definitivo.....	81
2.5 SEZIONE TIPO PIAZZOLA B0 – PARAMETRI DI RESISTENZA MASSIMI .....	88
2.5.1 <i>Fasi di calcolo</i> .....	92
2.5.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti .....	95
2.5.1.1.1 Rivestimento di prima fase .....	95
2.5.1.1.2 Rivestimento definitivo.....	97
<b>3. VERIFICA SEZIONE TIPO - COPERTURA <math>25 &lt; H &lt; 50</math> M</b> .....	<b>105</b>

3.1	SEZIONE TIPO B0 – PARAMETRI DI RESISTENZA MINIMI.....	105
3.1.1	<i>Fasi di calcolo</i> .....	110
3.1.1.1	Verifiche statiche dei rivestimenti .....	112
3.1.1.1.1	Rivestimento di prima fase .....	112
3.1.1.1.2	Rivestimento definitivo .....	114
3.2	SEZIONE TIPO B0 – PARAMETRI DI RESISTENZA MASSIMI.....	121
3.2.1	<i>Fasi di calcolo</i> .....	125
3.2.1.1	Verifiche statiche dei rivestimenti .....	127
3.2.1.1.1	Rivestimento di prima fase .....	127
3.2.1.1.2	Rivestimento definitivo .....	129
3.3	SEZIONE TIPO B2 – PARAMETRI DI RESISTENZA MINIMI.....	137
3.3.1	<i>Fasi di calcolo</i> .....	142
3.3.1.1	Verifiche statiche dei rivestimenti .....	144
3.3.1.1.1	Rivestimento di prima fase .....	144
3.3.1.1.2	Rivestimento definitivo .....	146
3.4	SEZIONE TIPO B2 – PARAMETRI DI RESISTENZA MASSIMI.....	154
3.4.1	<i>Fasi di calcolo</i> .....	158
3.4.1.1	Verifiche statiche dei rivestimenti .....	160
3.4.1.1.1	Rivestimento di prima fase .....	160
3.4.1.1.2	Rivestimento definitivo .....	162
3.5	SEZIONE TIPO PIAZZOLA B0 – PARAMETRI DI RESISTENZA MASSIMI .....	171
3.5.1	<i>Fasi di calcolo</i> .....	175
3.5.1.1	Verifiche statiche dei rivestimenti .....	178
3.5.1.1.1	Rivestimento di prima fase .....	178
3.5.1.1.2	Rivestimento definitivo .....	180
<b>4.</b>	<b>VERIFICA SEZIONE TIPO - COPERTURA <math>15 &lt; H &lt; 25</math> M.....</b>	<b>189</b>
4.1	SEZIONE TIPO B0V .....	189
4.1.1	<i>Fasi di calcolo</i> .....	194
4.1.1.1	Verifiche statiche dei rivestimenti .....	195
4.1.1.1.1	Rivestimento di prima fase .....	195
4.1.1.1.2	Rivestimento definitivo .....	197
4.2	SEZIONE TIPO B2 – PARAMETRI DI RESISTENZA MINIMI.....	203
4.2.1	<i>Fasi di calcolo</i> .....	208
4.2.1.1	Verifiche statiche dei rivestimenti .....	209
4.2.1.1.1	Rivestimento di prima fase .....	209

4.2.1.1.2	Rivestimento definitivo .....	211
4.3	SEZIONE TIPO B2 – PARAMETRI DI RESISTENZA MASSIMI.....	219
4.3.1	<i>Fasi di calcolo</i> .....	224
4.3.1.1	Verifiche statiche dei rivestimenti .....	225
4.3.1.1.1	Rivestimento di prima fase .....	225
4.3.1.1.2	Rivestimento definitivo .....	227
<b>5.</b>	<b>VERIFICA SEZIONE TIPO - COPERTURA H &lt; 15 M.....</b>	<b>235</b>
5.1	SEZIONE TIPO B2V .....	235
5.1.1	<i>Fasi di calcolo</i> .....	240
5.1.1.1	Verifiche statiche dei rivestimenti .....	241
5.1.1.1.1	Rivestimento di prima fase .....	241
5.1.1.1.2	Rivestimento definitivo .....	243

## 1. VERIFICA SEZIONE TIPO - COPERTURA $80 < H < 110$ M

Le formazioni incluse nella tratta di copertura tra 50 e 110 m sono:

- Formazione di Camerino (Associazione Pelitica Arenacea);
- Formazione di Camerino (Associazione Arenaceo - Pelitica);

### 1.1 Sezione tipo B2\* – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2*	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
80 < z < 110	c'	[kPa]	220 – 250	250
	$\varphi'$	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	300	300
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B2\*.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una condizione di copertura pari a 95 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

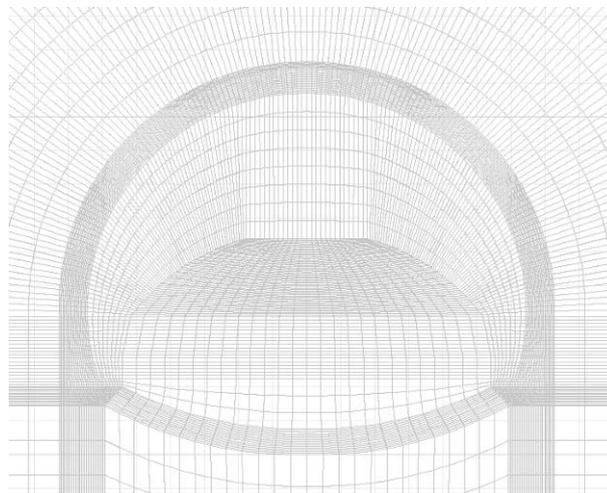
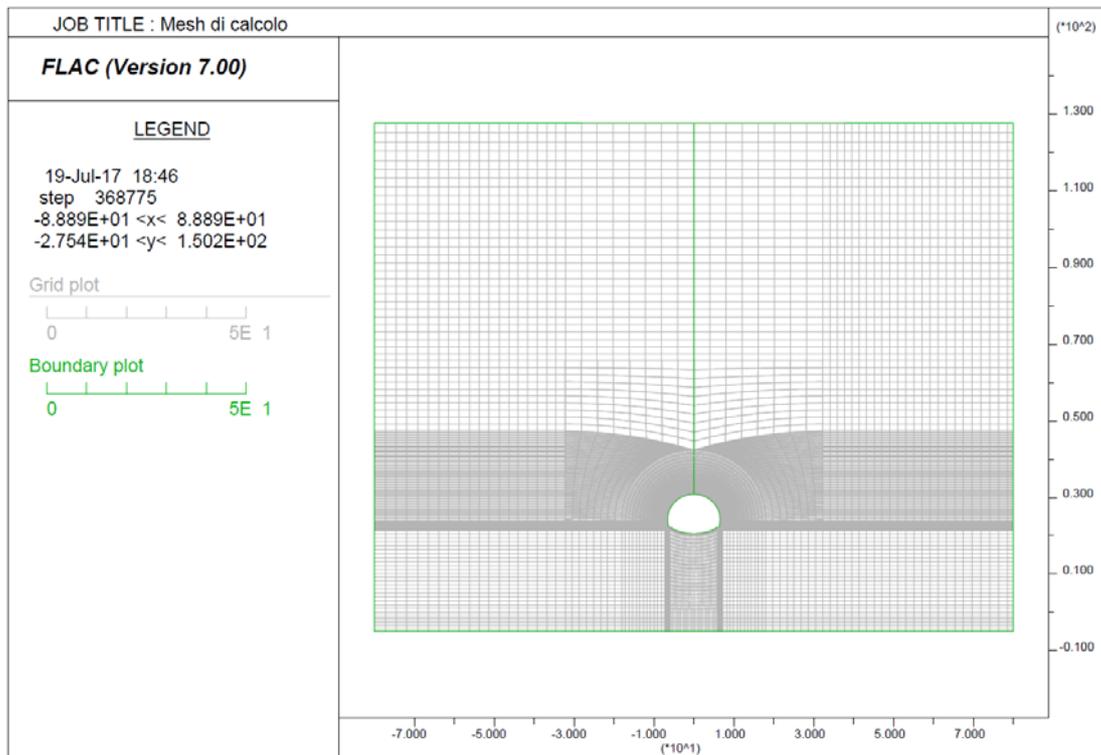
Il prerinvestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

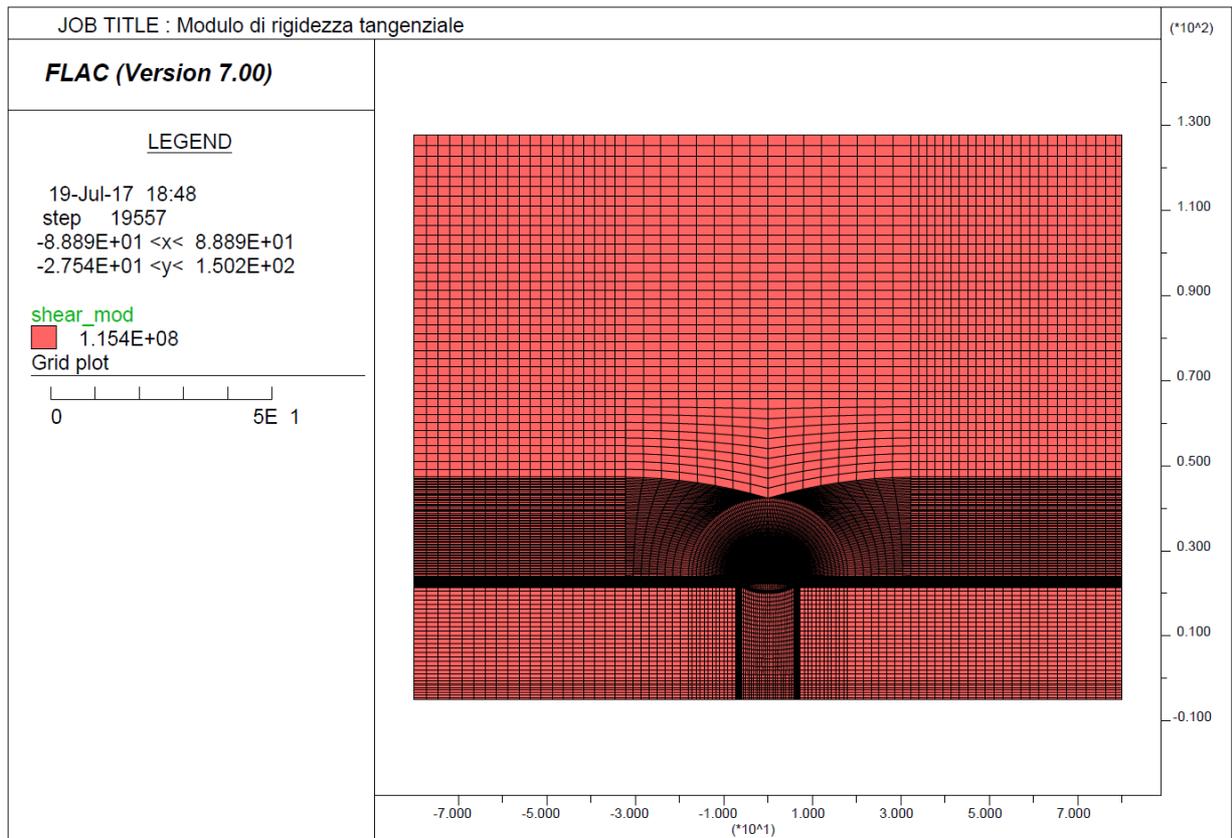
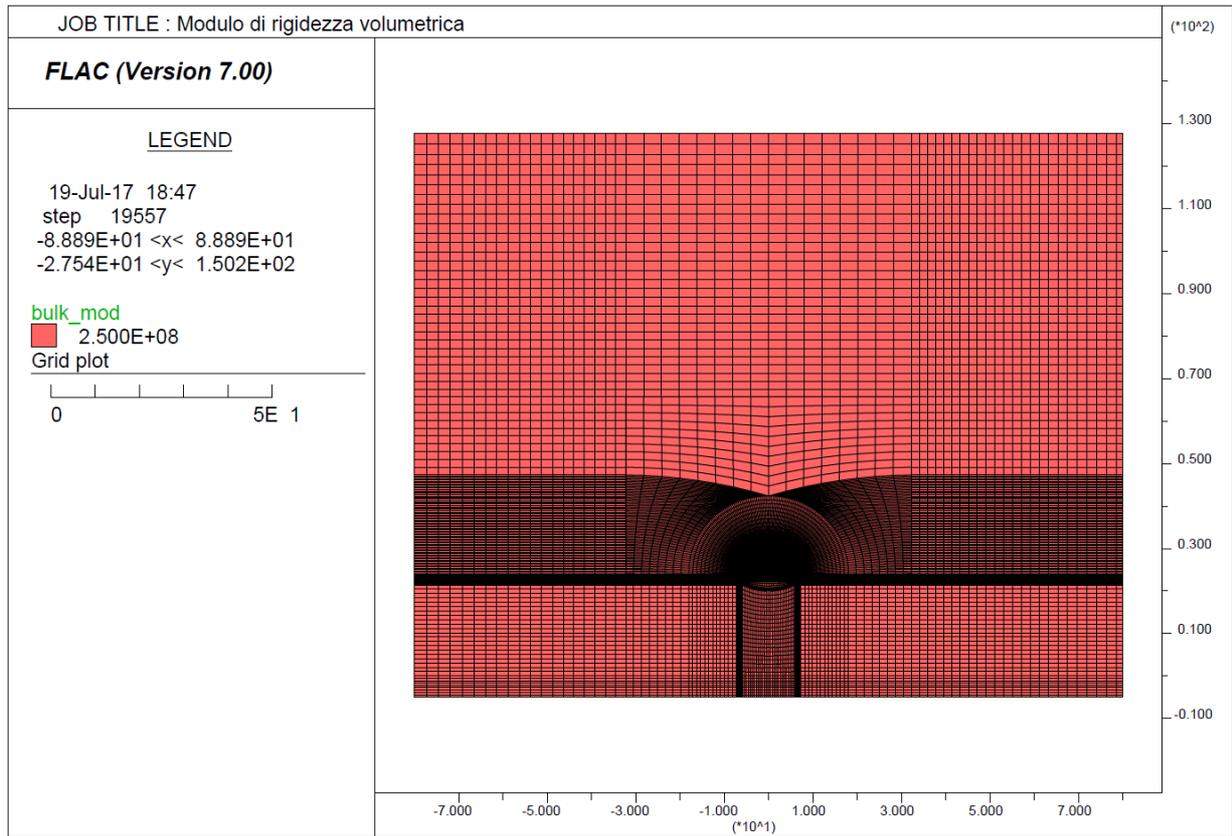
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

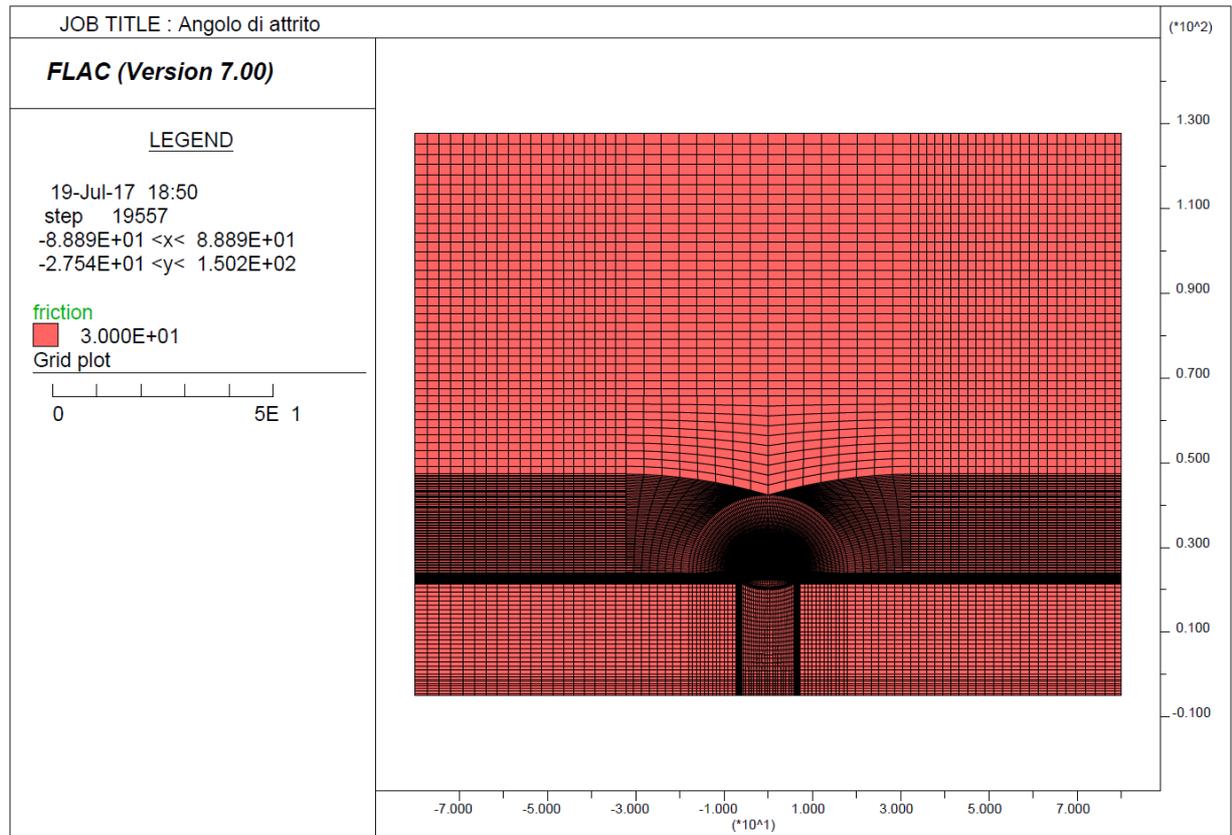
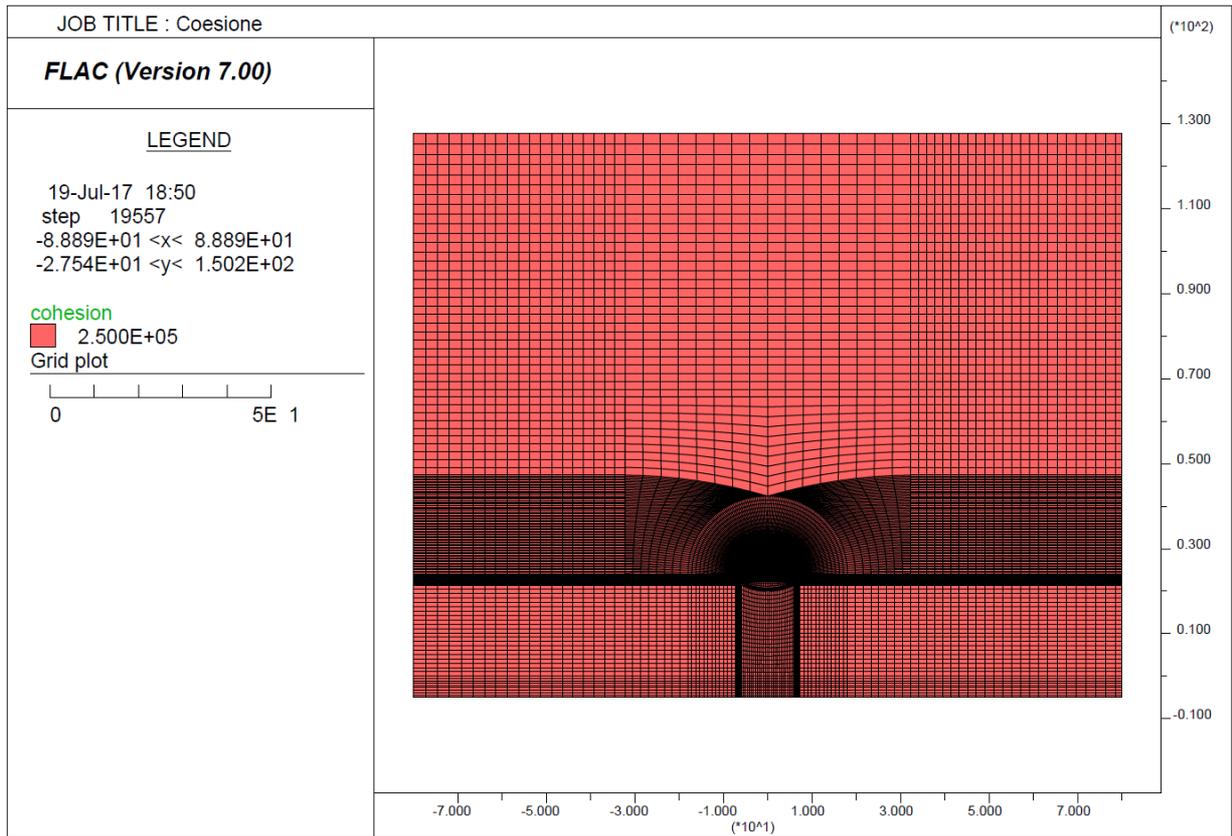
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

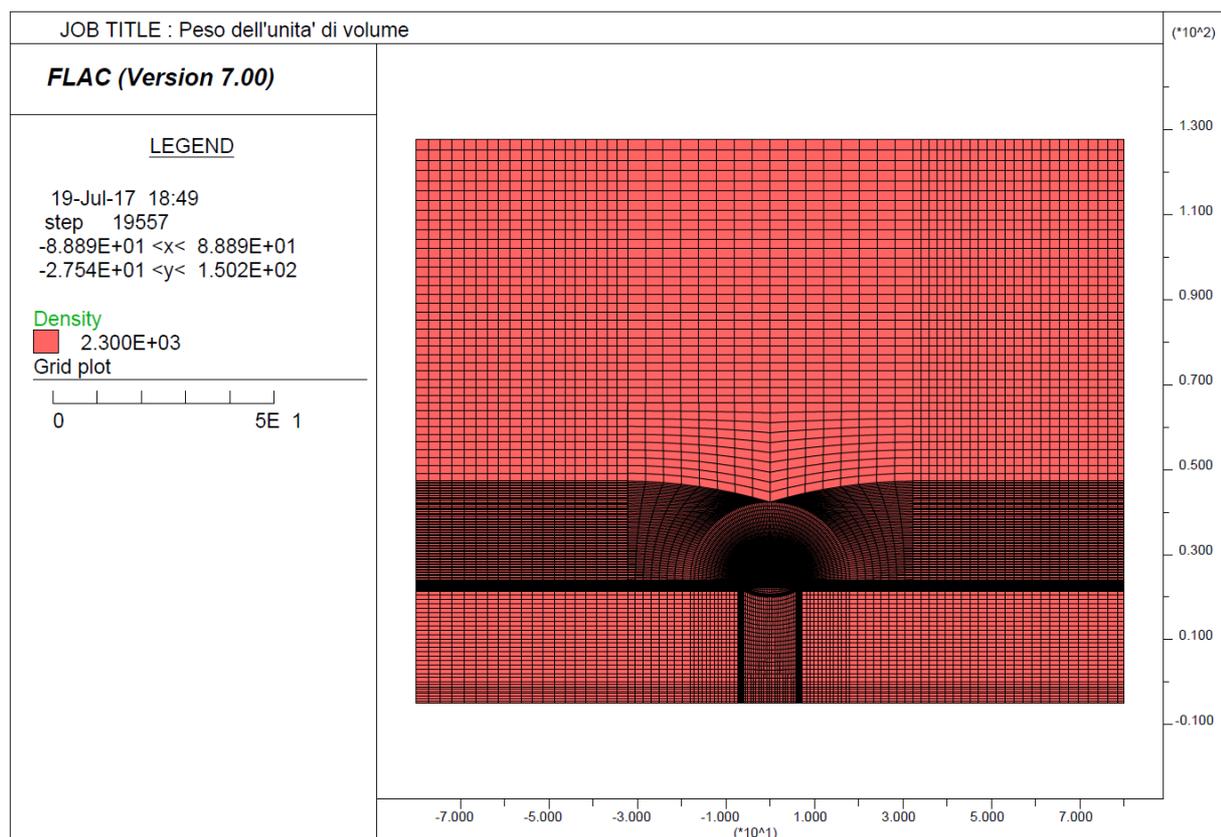
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo B2\* - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	71,0%	3,3	-
Step 3	Scavo	1	75,0%	0,56*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	75,0%	0,56*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	90,7%	1,63*	1,07
Step 6	Avanzamento 2 D ( E SB = 31 Gpa)	29	96,5%	2,24*	1,68
Step 7	Getto arco rovescio e muretta a 2D e avanzamento fino a deformazioni esaurite	-	100,0%	-	1,68
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	1,68
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	1,68

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

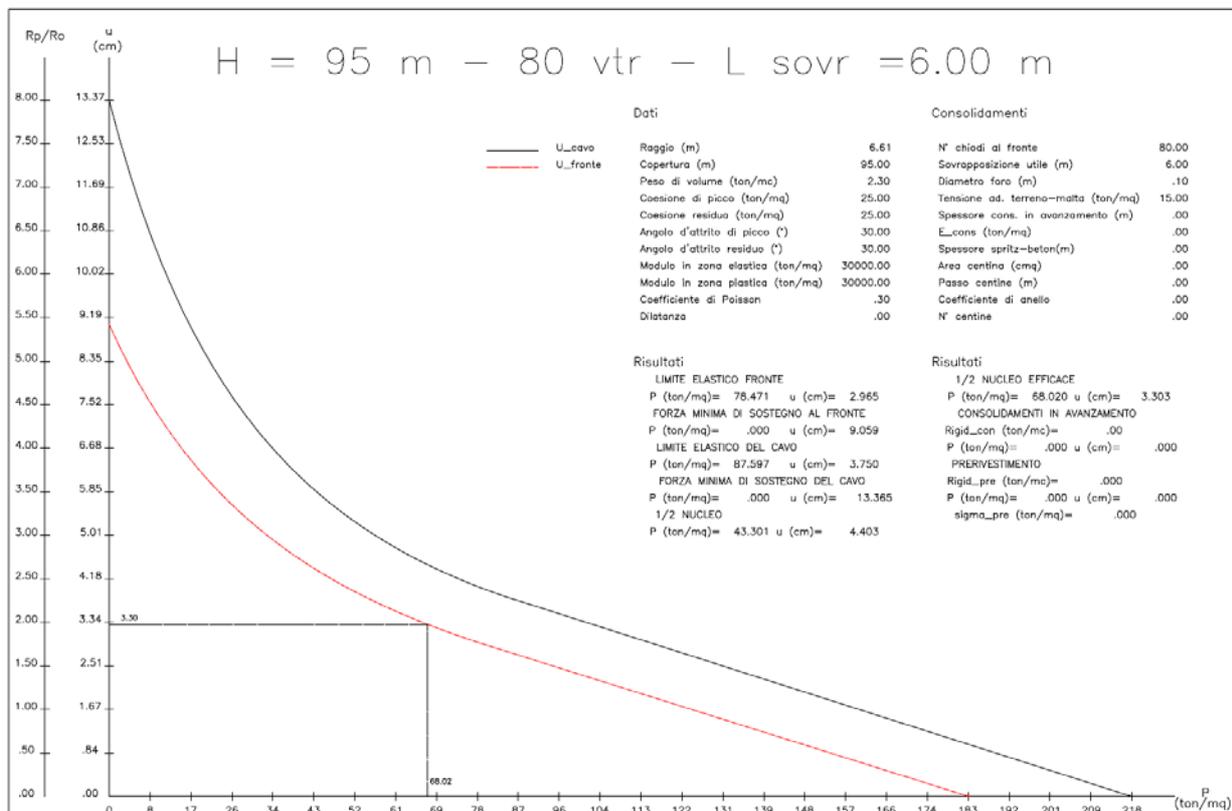
### 1.1.1 Fasi di calcolo

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il prriverimento e per il rivestimento definitivo.

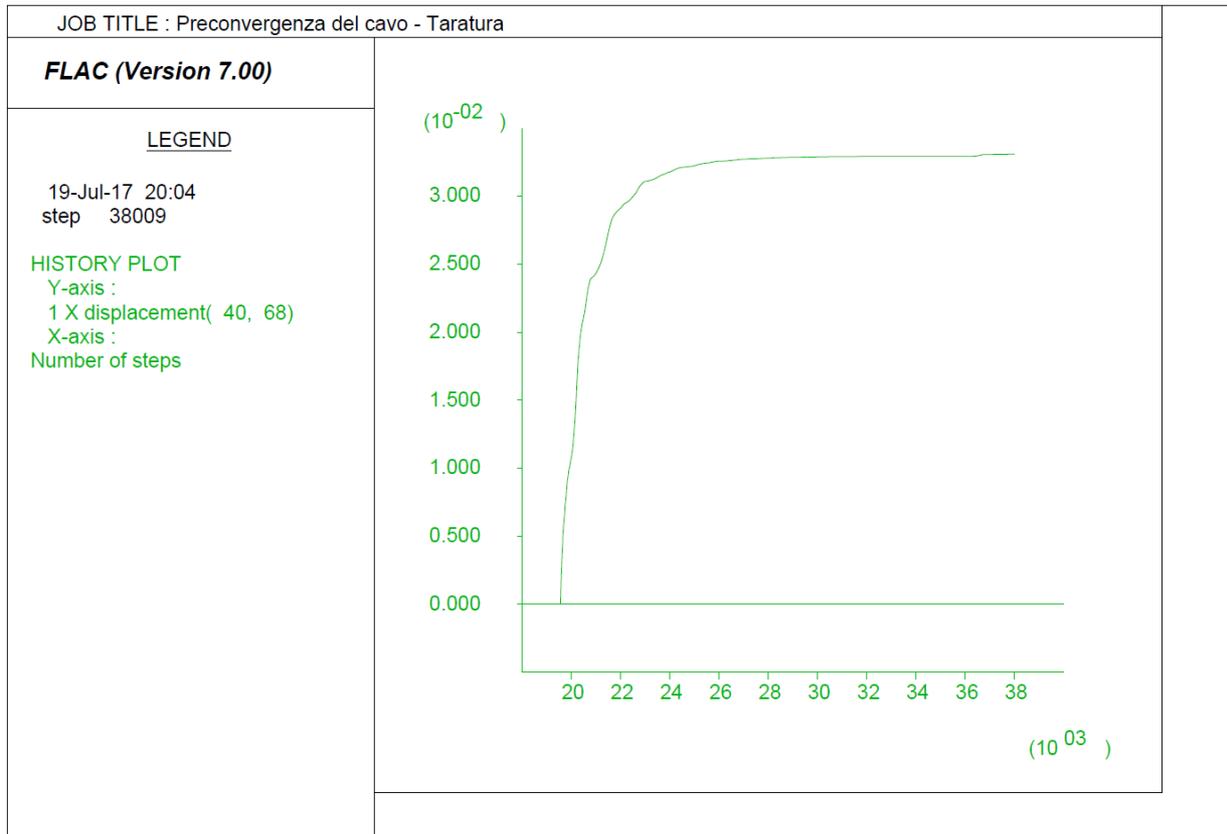
Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

**Fase 1** In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

**Fase 2** Questa fase, generalmente indicata come fase di taratura del modello, consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo. Il contributo statico fornito dalla porzione di ammasso oltre il fronte non ancora scavato viene simulato rilasciando il 71% delle forze di scavo. Tale valore è stato tarato sulla base delle indicazioni fornite dalle curve caratteristiche che, per il caso in analisi, indica una preconvergenza massima di circa 3.30 cm così come evidente dalla curva caratteristica riportata sotto.



L'output del programma di calcolo FLAC riporta lo spostamento del cavo in corrispondenza di questo step di calcolo sul piedritto sx del modello.



Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.750)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 200 / 100) con spritz beton (30 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.750)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a ½ D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton ( $E = 10 \text{ GPa}$ ) (fattore di rilascio = 0.907)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino a 2 D (fattore di rilascio = 0.965).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1.00)

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

### 1.1.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti

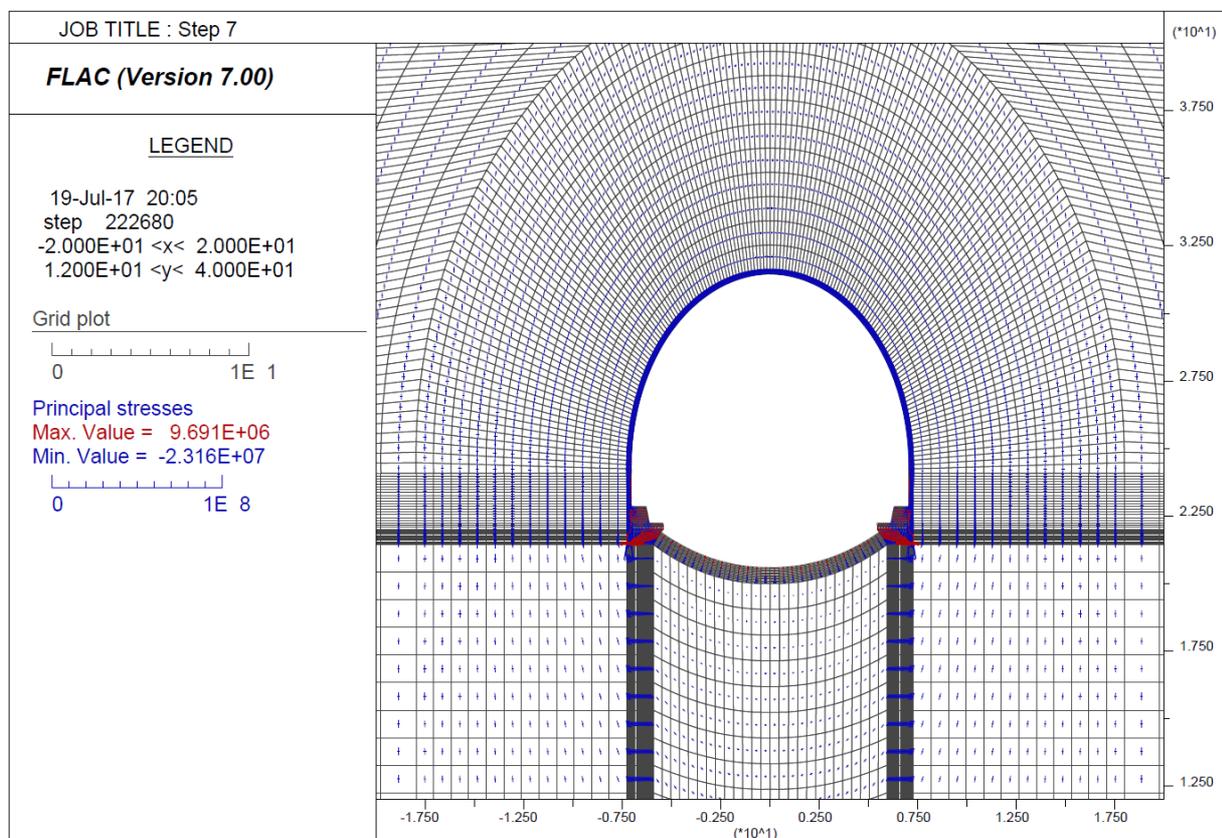
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

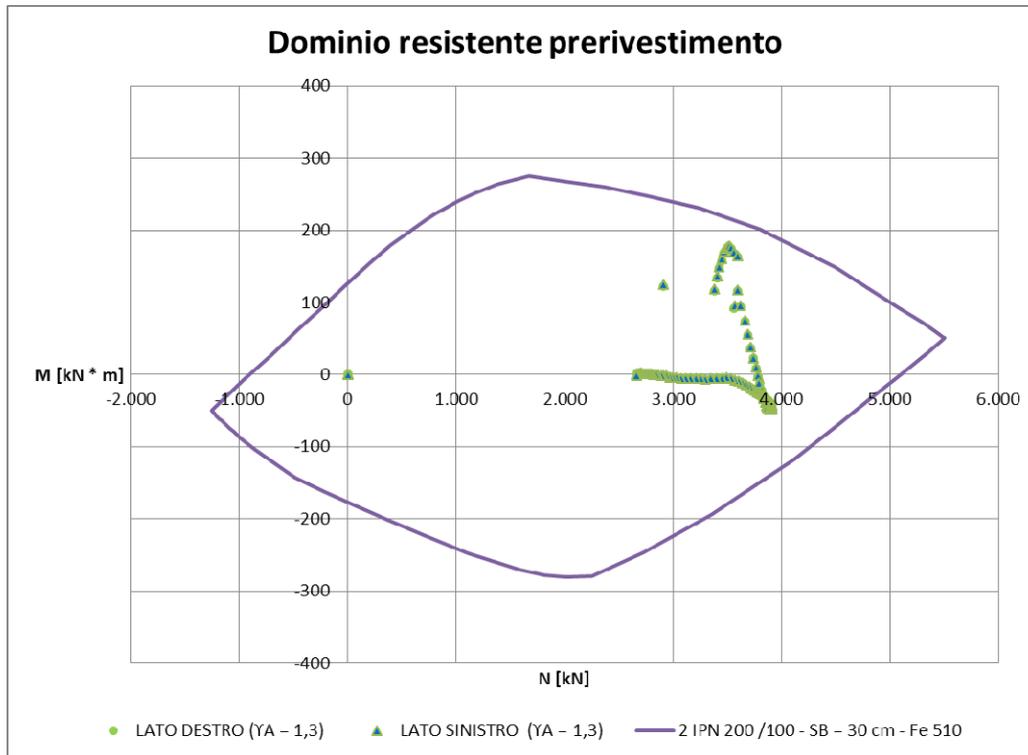
#### 1.1.1.1.1 Rivestimento di prima fase

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 200 / 100 – SB = 30 cm).



Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

Verifica CA. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	30	1	20,34	1
			2	20,34	21

Sollecitazioni

S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>   kN

M<sub>xEd</sub>   kNm

M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N

Centro  Baricentro cls

Coord.[cm] xN  yN

Tipo rottura \_\_\_\_\_

Materiali

Fe510 C25/30

$\epsilon_{su}$  67.5 %  $\epsilon_{c2}$  2 %

$f_{yd}$  338.1 N/mm<sup>2</sup>  $\epsilon_{cu}$  3.5 %

$E_s$  200.000 N/mm<sup>2</sup>  $f_{cd}$  14.17

$E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8 ?

$\epsilon_{syd}$  1.691 %  $\sigma_{c,adm}$  9.75

$\sigma_{s,adm}$  240 N/mm<sup>2</sup>  $\tau_{co}$  0.6

$\tau_{c1}$  1.829

M<sub>xRd</sub>  kN m

$\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_s$   N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_c$   %

$\epsilon_s$   %

d  cm

x  x/d

$\delta$

Tipo Sezione

Rettan.re  Trapezi

a T  Circolare

Rettangoli  Coord.

Metodo di calcolo

S.L.U.+  S.L.U.-

Metodo n

Tipo flessione

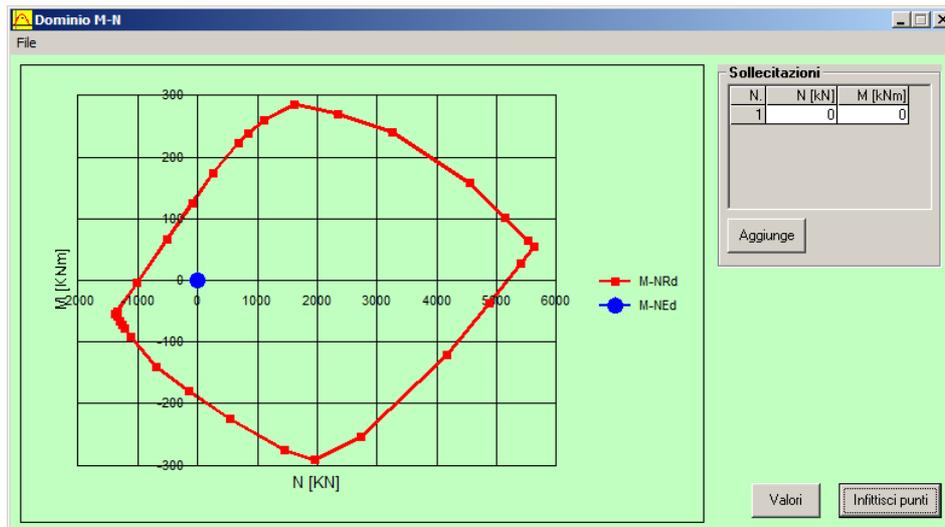
Retta  Deviate

N° rett. 100

Calcola MRd  Dominio M-N

L<sub>0</sub>  cm Col. modello

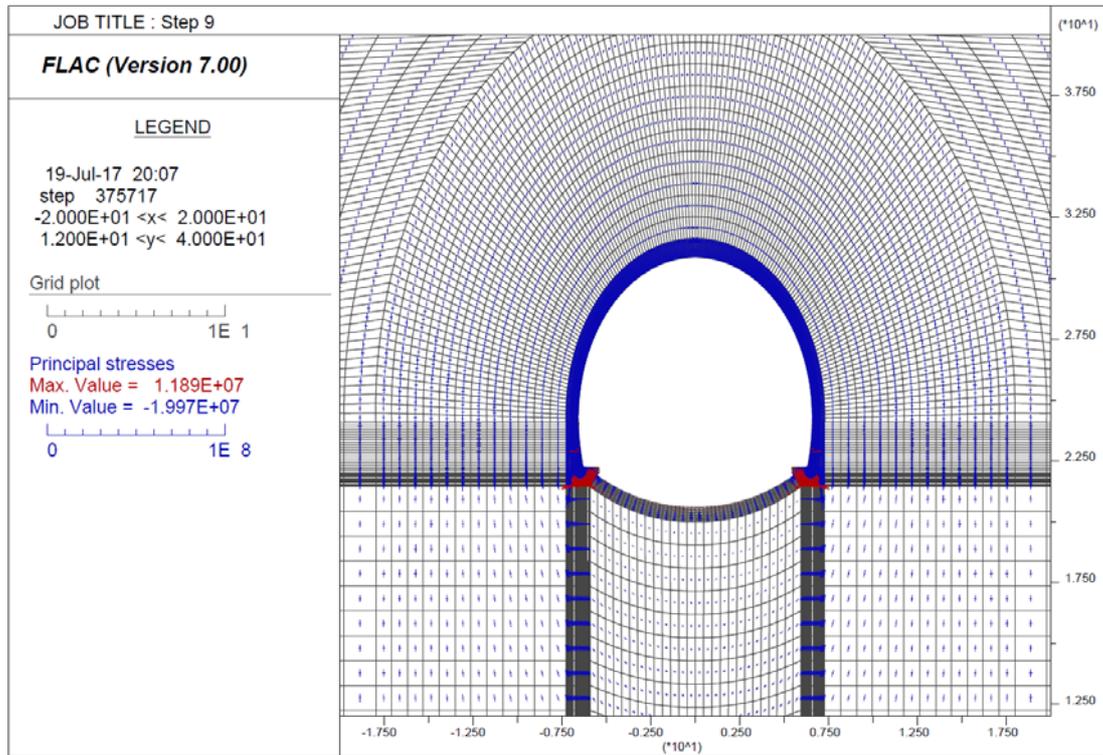
Precompresso



### 1.1.1.1.2 Rivestimento definitivo

Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase).

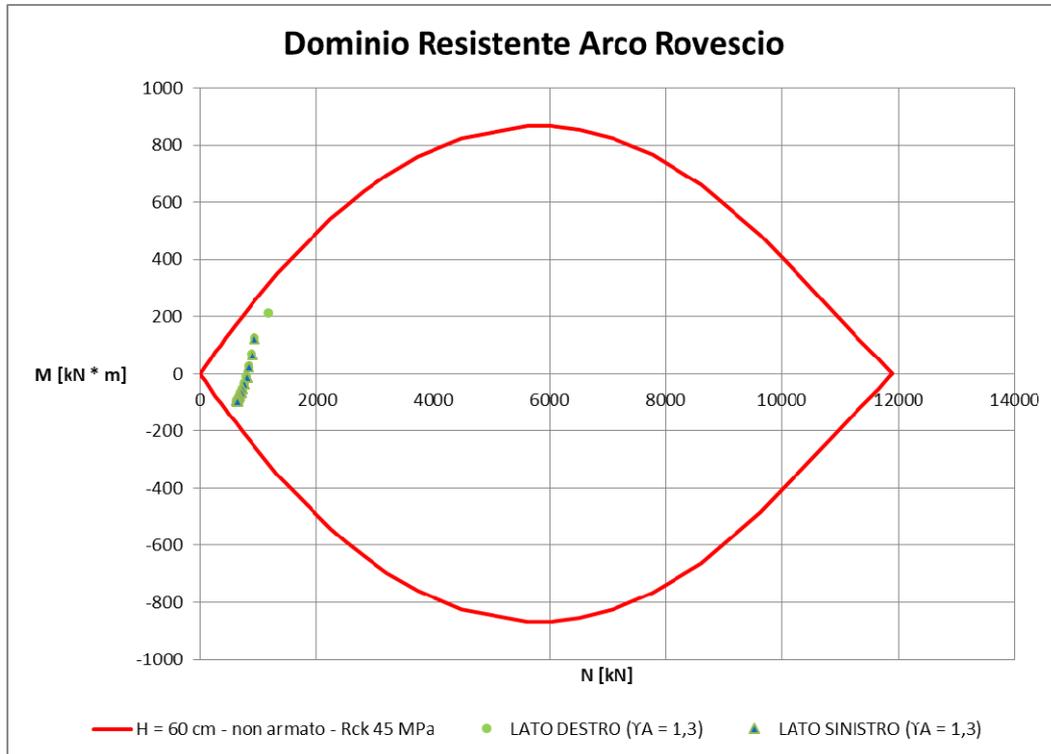
La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



## Arco rovescio - H = 60 cm

### Verifica SLU

#### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Stato limite di fessurazione

#### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	717	95
<i>Muretta dx</i>	711	99
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	479	-74

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ X

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	0	5,5
			2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettang. re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U. → Metodo n  
←

N<sub>Ed</sub> 0 717 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 95 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord. [cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm²	$f_{cd}$	19.83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13.5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm²	$\tau_{co}$	0.8
		$\tau_{cl}$	2.257

$\sigma_c$  -2.854 N/mm²  
 $\sigma_s$  3.619 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.0181 ‰  
 d 54.5 cm  
 x 50.25 x/d 0.922  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 3

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ X

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	0	5,5
			2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettang. re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U. → Metodo n  
←

N<sub>Ed</sub> 0 711 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 99 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord. [cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm²	$f_{cd}$	19.83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13.5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm²	$\tau_{co}$	0.8
		$\tau_{cl}$	2.257

$\sigma_c$  -2.949 N/mm²  
 $\sigma_s$  5.752 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.02876 ‰  
 d 54.5 cm  
 x 48.23 x/d 0.8849  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 3

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	0	5,5
			2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettang.  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 479 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 -74 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	19.83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13.5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0.8
		$\tau_{ci}$	2.257

$\sigma_c$  -2.195 N/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_s$  8.179 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_s$  0.0409 ‰  
d 54.5 cm  
x 43.65 x/d 0.801  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 4

Precompresso

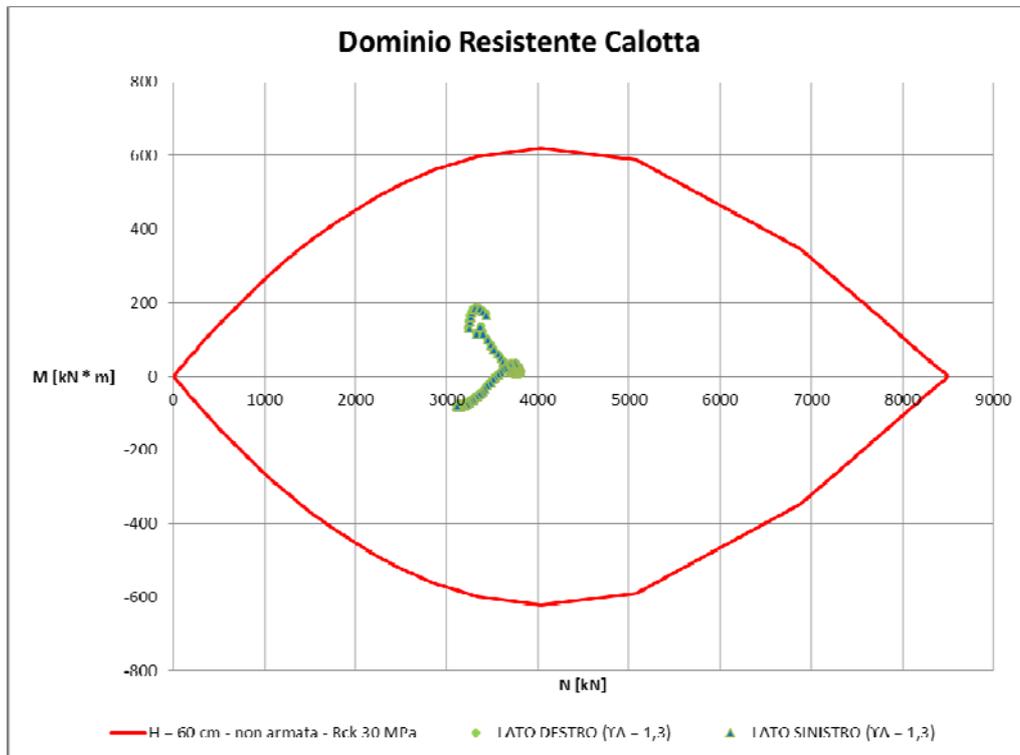
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione di mezzeria dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 600 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 545 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 545 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 55 [mm]
<a href="#">Armatura tesa ordinaria</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,1</sub> = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>r,1</sub> = 1 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,1</sub> = 3 [mm <sup>2</sup> ]
<a href="#">Armatura tesa di infittimento</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,2</sub> = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>r,2</sub> = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,2</sub> = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	f <sub>ck</sub> = 32 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub> = 3,0 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub> = 33346 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub> = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub> = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub> = 8,18 [MPa]
Asse neutro della sezione	X = 436,5 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	α <sub>e</sub> = 6,00 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	A <sub>s</sub> = 3 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	A <sub>c,eff.1</sub> = 137500 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.2</sub> = 54500 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.3</sub> = 300000 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.min</sub> = 54500 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>p,eff</sub> = 0,00006 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub> = 3,0 [MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub> = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	[ε <sub>sm</sub> - ε <sub>cm</sub> ] <sub>min</sub> = 0,000025 [-]
	[ε <sub>sm</sub> - ε <sub>cm</sub> ] <sub>calc.</sub> = -0,104909 [-]
	<b>[ε<sub>sm</sub> - ε<sub>cm</sub>] = 0,000025 [-]</b>
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	φ <sub>eq</sub> = 1,00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub> = 277,5 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub> = 0,800 [-] k <sub>2</sub> = 0,500 [-] k <sub>3</sub> = 3,400 [-] k <sub>4</sub> = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	s <sub>r,max.1</sub> = 3136 [mm]
	s <sub>r,max.2</sub> = 213 [mm]
	<b>s<sub>r,max</sub> = 3136 [mm]</b>
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>	
	w <sub>k,lim</sub> = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b>w<sub>k</sub> = 0,08 [mm]</b>

## Calotta – H = 60 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Rene sx</i>	2902	25
<i>Rene dx</i>	2886	22
<i>Chiave</i>	2395	-61

**Verifica C.A. S.L.U. - File:**

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	0	5,5
			2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n  
 N<sub>Ed</sub> 0 2902 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 25 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C25/30  
 $\epsilon_{su}$  67,5 %  $\epsilon_{c2}$  2 %  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3,5  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  14,17  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8 ?  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 %  $\sigma_{c,adm}$  9,75  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0,6  
 $\tau_{c1}$  1,829

$\sigma_c$  -5,253 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,3372 %

Verifica N° iterazioni: 0  
 Precompresso

**Verifica C.A. S.L.U. - File:**

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	0	5,5
			2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n  
 N<sub>Ed</sub> 0 2886 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 22 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C25/30  
 $\epsilon_{su}$  67,5 %  $\epsilon_{c2}$  2 %  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3,5  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  14,17  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8 ?  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 %  $\sigma_{c,adm}$  9,75  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0,6  
 $\tau_{c1}$  1,829

$\sigma_c$  -5,177 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,3383 %

Verifica N° iterazioni: 0  
 Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ X

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  2395 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -61 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C25/30	
$\epsilon_{su}$	67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391,3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3,5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	14,17
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0,8 ?
$\epsilon_{syd}$	1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9,75
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{c0}$	0,6
		$\tau_{c1}$	1,829

$\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_s$   ‰

Verifica

N° iterazioni:

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

## 2. VERIFICA SEZIONE TIPO - COPERTURA $50 < H < 80$ M

Le formazioni incluse nella tratta di copertura tra 50 e 80 m sono:

- Formazione di Camerino (Associazione Pelitica Arenacea);
- Formazione di Camerino (Associazione Arenaceo - Pelitica);
- Formazione dello Schlier.

### 2.1 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza minimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	220
	$\varphi'$	[°]	25 – 30	25
	E	[MPa]	300	300
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B2.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una condizione di copertura pari a 80 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

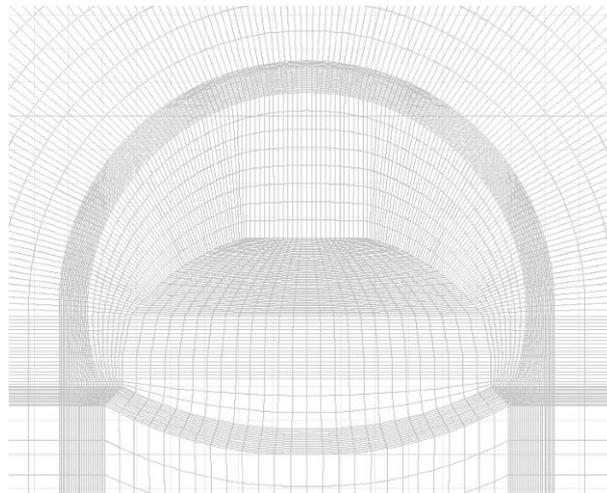
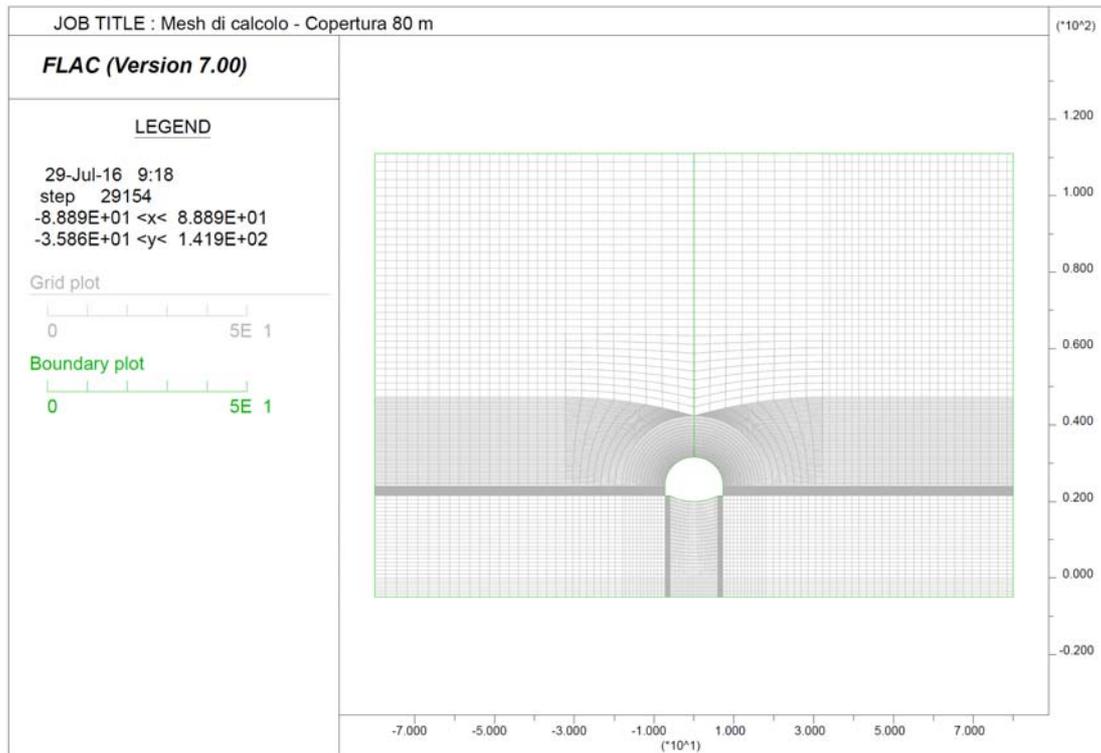
Il priverivestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

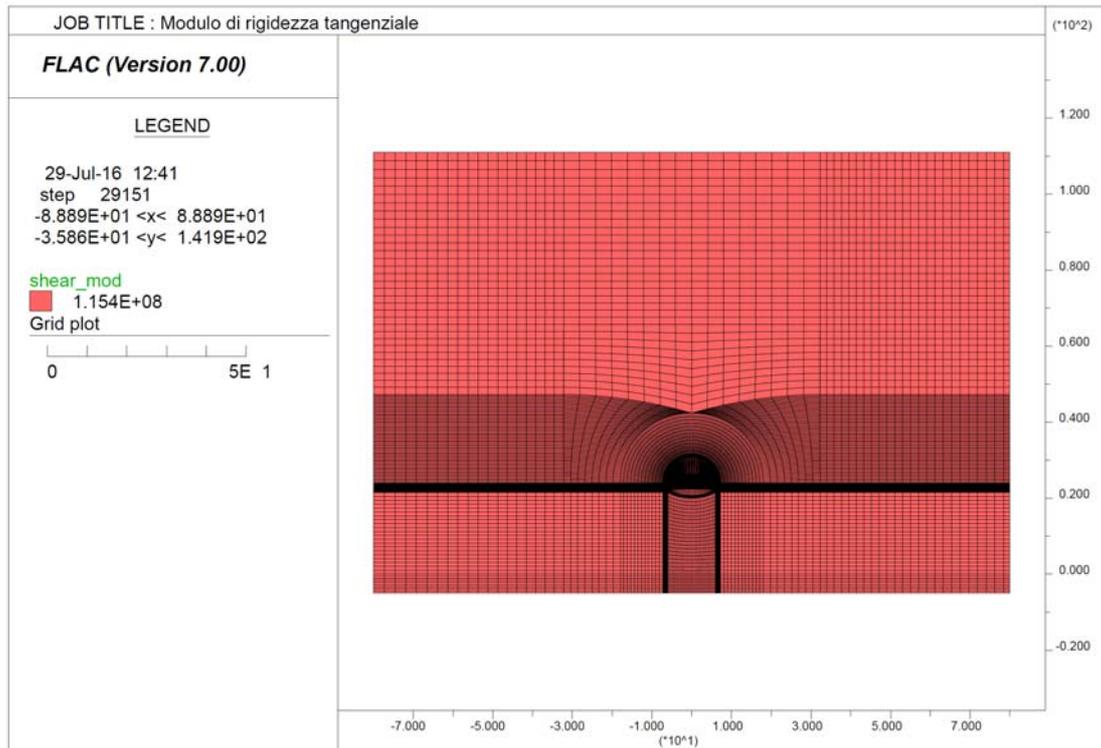
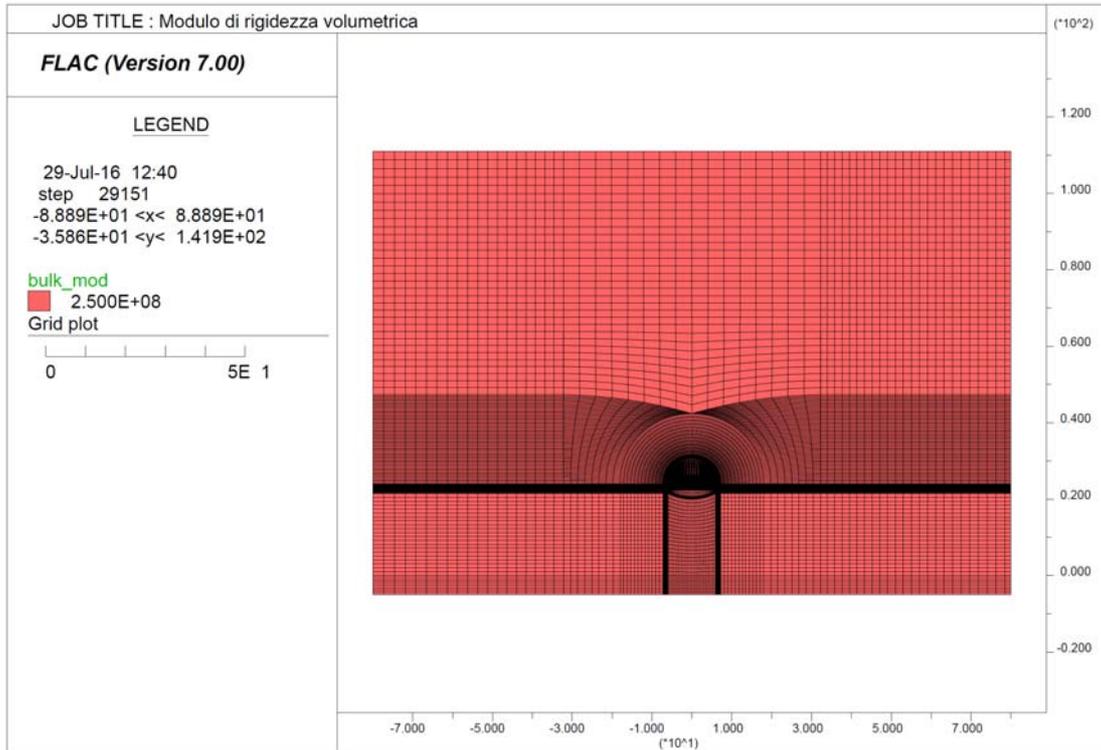
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

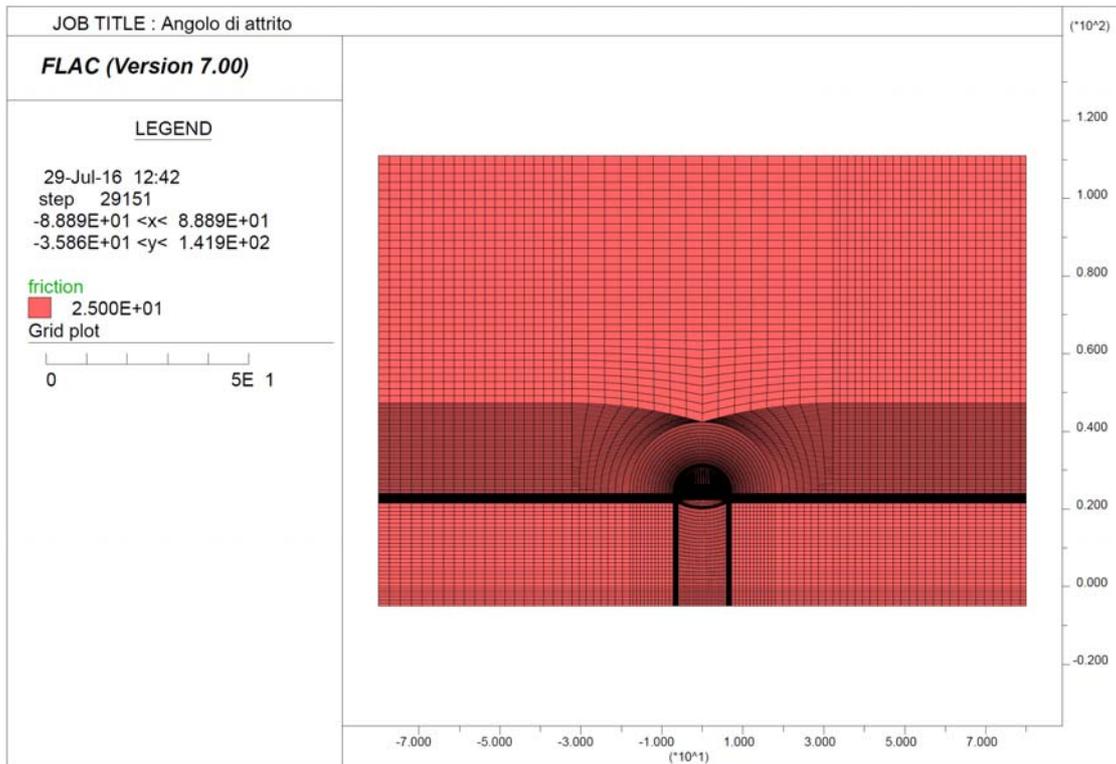
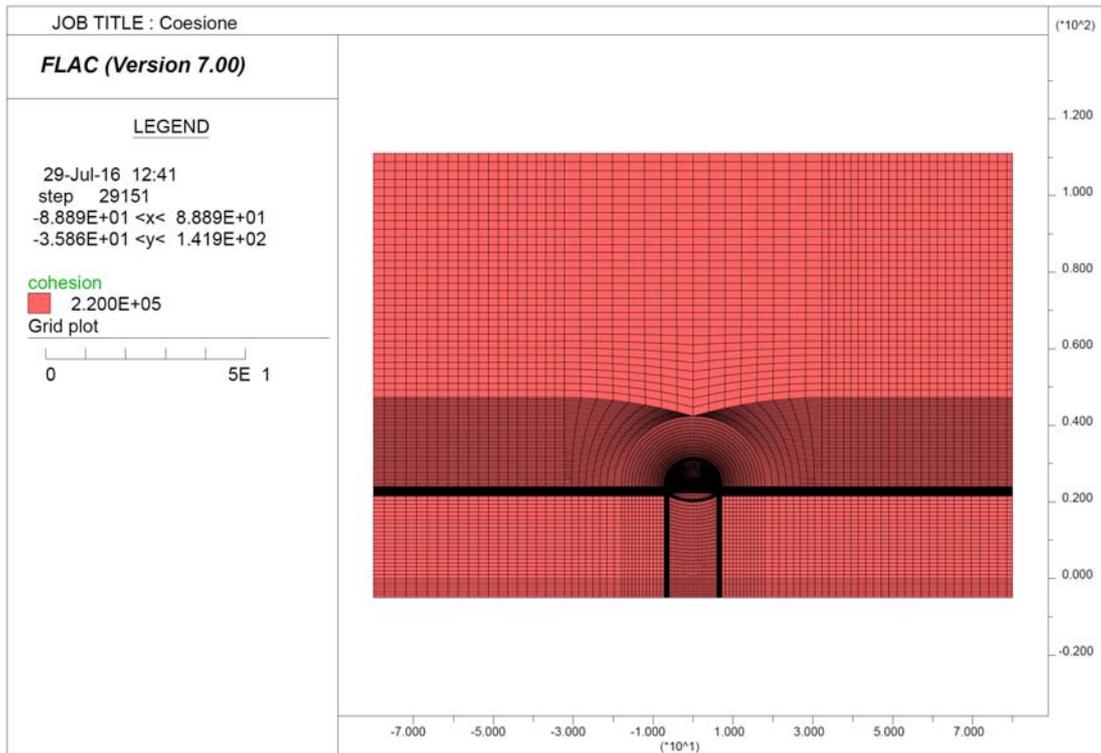
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

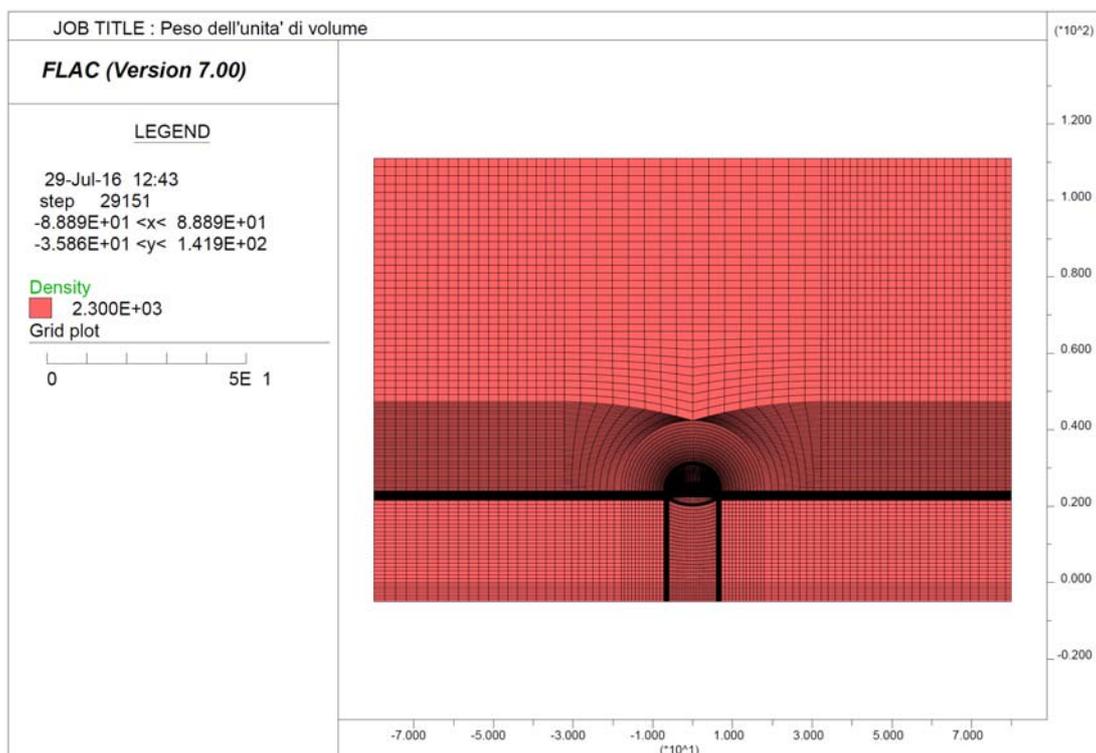
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo B2 - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	69,0%	3,39	-
Step 3	Scavo	1	73,3%	0,7*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	73,3%	0,7*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	90,1%	2,05*	1,36
Step 6	Avanzamento 2 D ( E SB = 31 Gpa)	29	96,3%	2,87*	2,17
Step 7	Getto arco rovescio e muretta a 2D e avanzamento fino a deformazioni esaurite	-	100,0%	-	2,17
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	2,17
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	2,17

\*spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

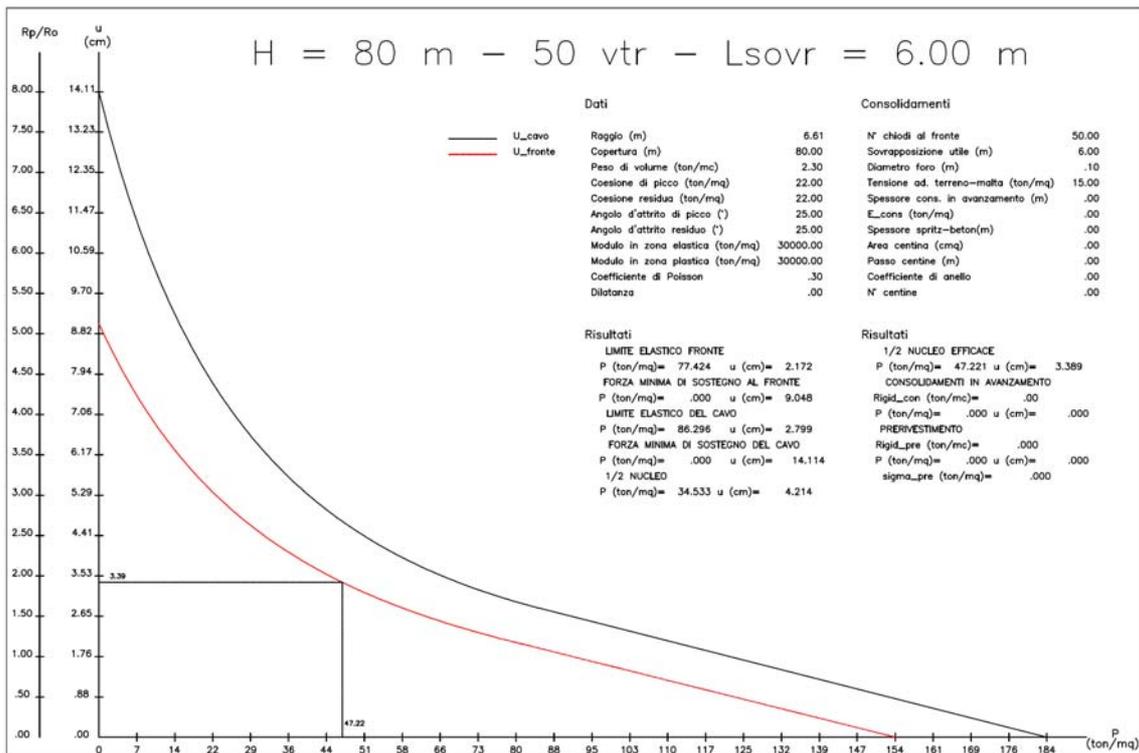
### 2.1.1 Fasi di calcolo

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il pririvestimento e per il rivestimento definitivo.

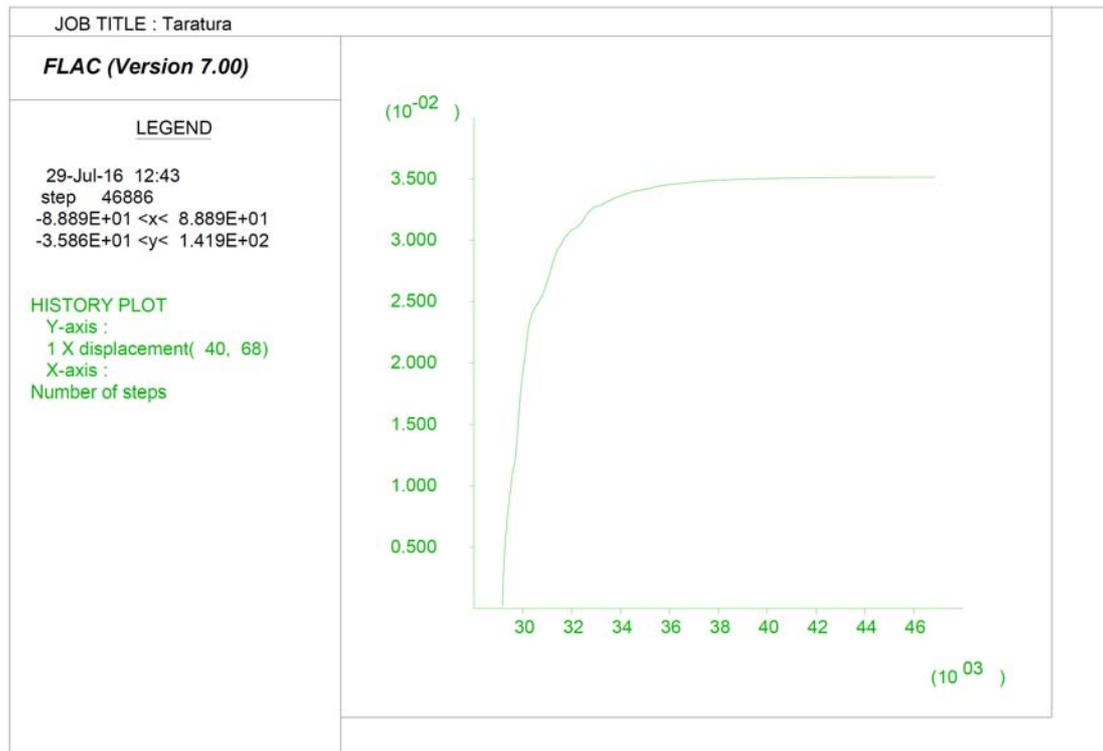
Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

**Fase 1** In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

**Fase 2** Questa fase, generalmente indicata come fase di taratura del modello, consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo. Il contributo statico fornito dalla porzione di ammasso oltre il fronte non ancora scavato viene simulato rilasciando il 69% delle forze di scavo. Tale valore è stato tarato sulla base delle indicazioni fornite dalle curve caratteristiche che, per il caso in analisi, indica una preconvergenza massima di circa 3.39 cm così come evidente dalla curva caratteristica riportata sotto.



L'output del programma di calcolo FLAC riporta lo spostamento del cavo in corrispondenza di questo step di calcolo sul piedritto sx del modello.



Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.733)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 200 / 100) con spritz beton (30 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.733)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a ½ D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton (E = 10 GPa) (fattore di rilascio = 0.901)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino a 2 D (fattore di rilascio = 0.963).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1.00)

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

### 2.1.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti

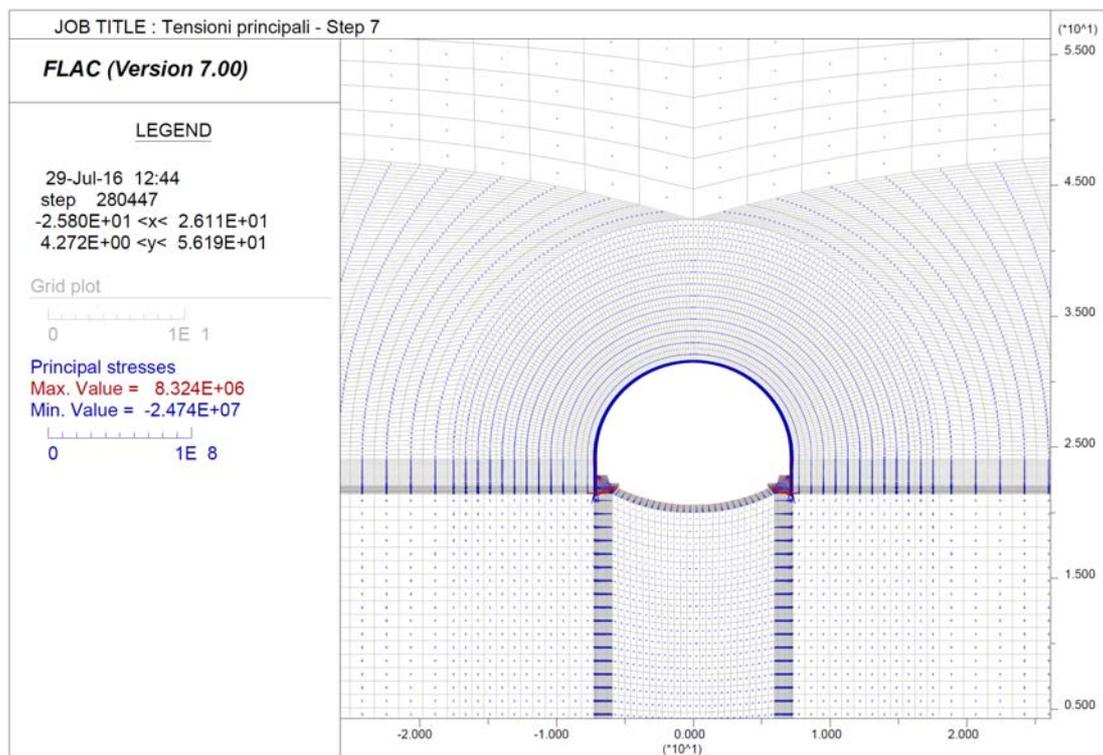
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

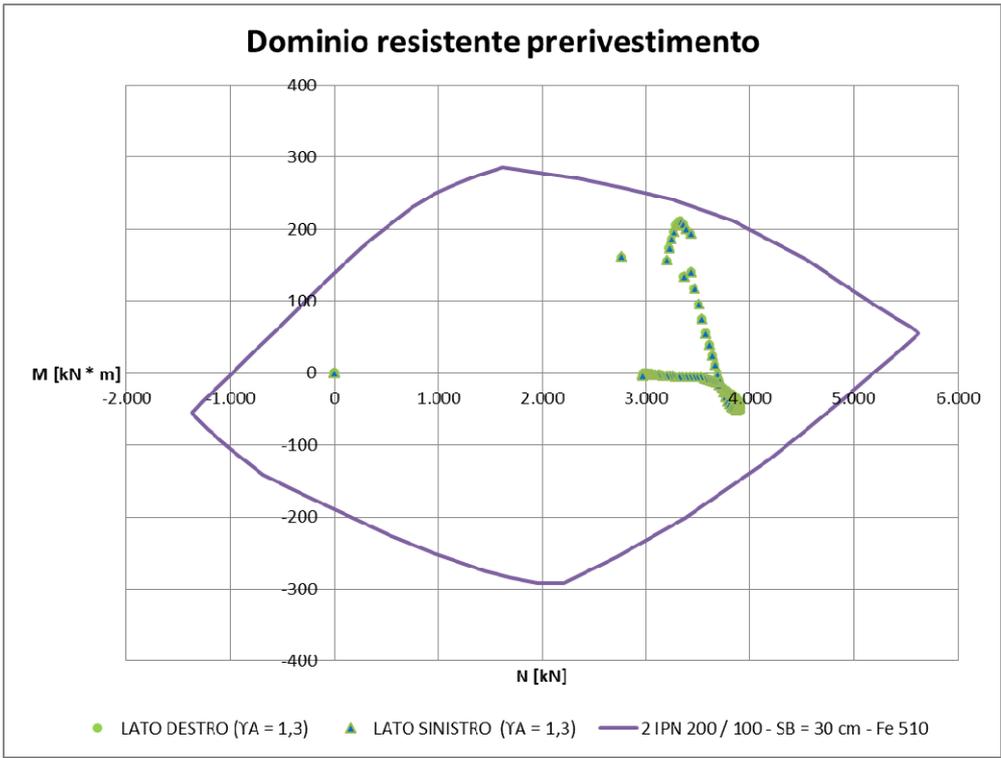
#### 2.1.1.1.1 Rivestimento di prima fase

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 200 / 100 – SB = 30 cm).



Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

TITOLO : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	30

N°	As [cm²]	d [cm]
1	20,34	1
2	20,34	21

Tipo Sezione  
 Rettan.re     Trapezi  
 a T     Circolare  
 Rettangoli     Coord.

Diagramma della sezione rettangolare con coordinate xN e yN.

Sollecitazioni  
 S.L.U.     Metodo n

P.to applicazione N  
 Centro     Baricentro cls  
 Coord.[cm]    xN     yN

Tipo rottura \_\_\_\_\_

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+     S.L.U.-  
 Metodo n

Tipo flessione  
 Retta     Deviata

N° rett.

Calcola MRd    Dominio M-N

L<sub>0</sub>  cm    Col. modello

Precompresso

Materiali

Fe510		C25/30	
$\epsilon_{su}$	67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	338,1 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3,5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	14,17
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0,8
$\epsilon_{syd}$	1,691 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9,75
$\sigma_{s,adm}$	240 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0,6
		$\tau_{c1}$	1,829

M<sub>xRd</sub>  kN m

$\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_s$   N/mm<sup>2</sup>

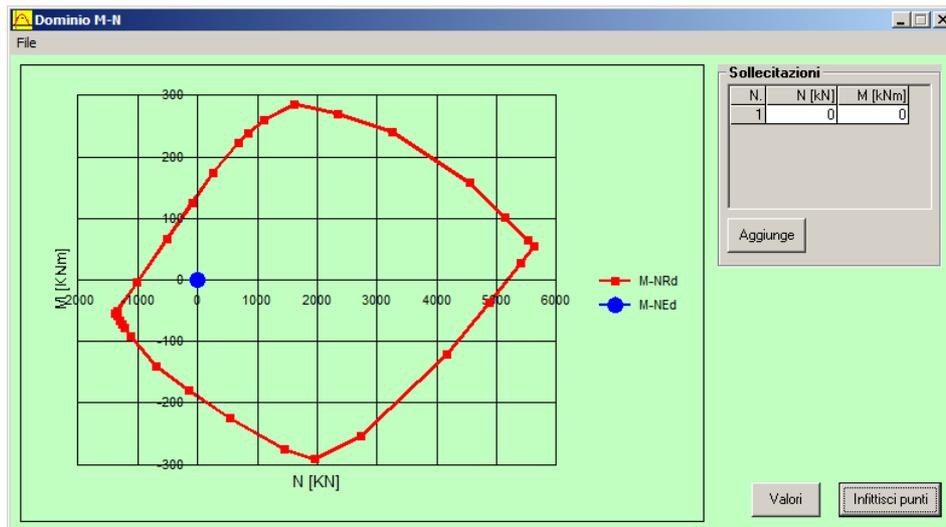
$\epsilon_c$  ‰

$\epsilon_s$  ‰

d  cm

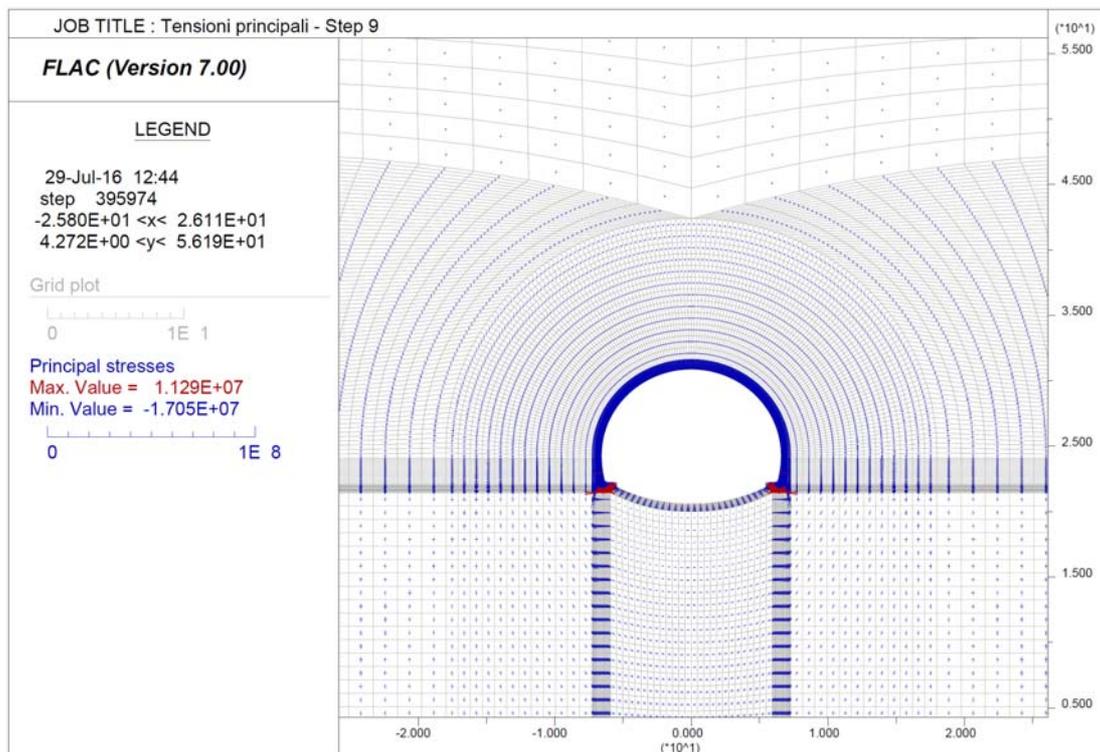
x  x/d

$\delta$



### 2.1.1.1.2 Rivestimento definitivo

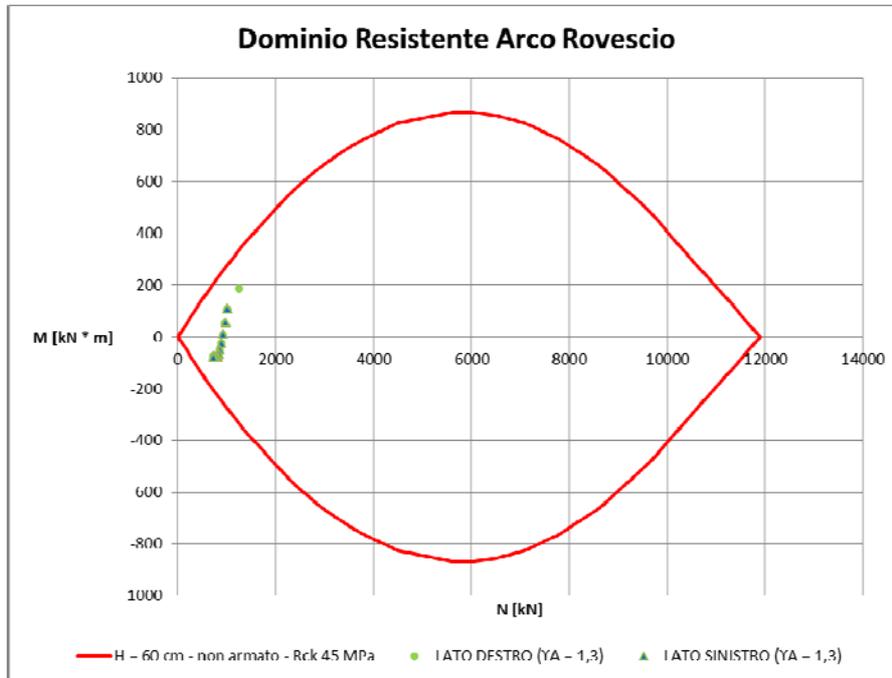
Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase). La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



## Arco rovescio - H = 60 cm

### Verifica SLU

#### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Stato limite di fessurazione

#### **Verifica nei confronti delle Punta tensionali**

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	783	84
<i>Muretta dx</i>	780	83
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	552	-60

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 783 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 84 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19.83  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13.5  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.8  
 $\tau_{c1}$  2,257

$\sigma_c$  -2,709 N/mm²  
 $\sigma_s$  -1,979 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,009895 ‰  
 d 55 cm  
 x 57,82 x/d 1,051  
 $\delta$  1

Verifica  
 N° iterazioni: 2  
 Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 780 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 83 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19.83  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13.5  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.8  
 $\tau_{c1}$  2,257

$\sigma_c$  -2,686 N/mm²  
 $\sigma_s$  -2,135 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,01067 ‰  
 d 55 cm  
 x 58,08 x/d 1,056  
 $\delta$  1

Verifica  
 N° iterazioni: 2  
 Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Solecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 552 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -60 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	19.83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13.5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0.8
		$\tau_{c1}$	2.257

$\sigma_c$  -1.924 N/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_s$  -1.202 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_s$  -0.006011 ‰  
 d 55 cm  
 x 57.39 x/d 1.043  
 $\delta$  1

Verifica  
 N° iterazioni: 2

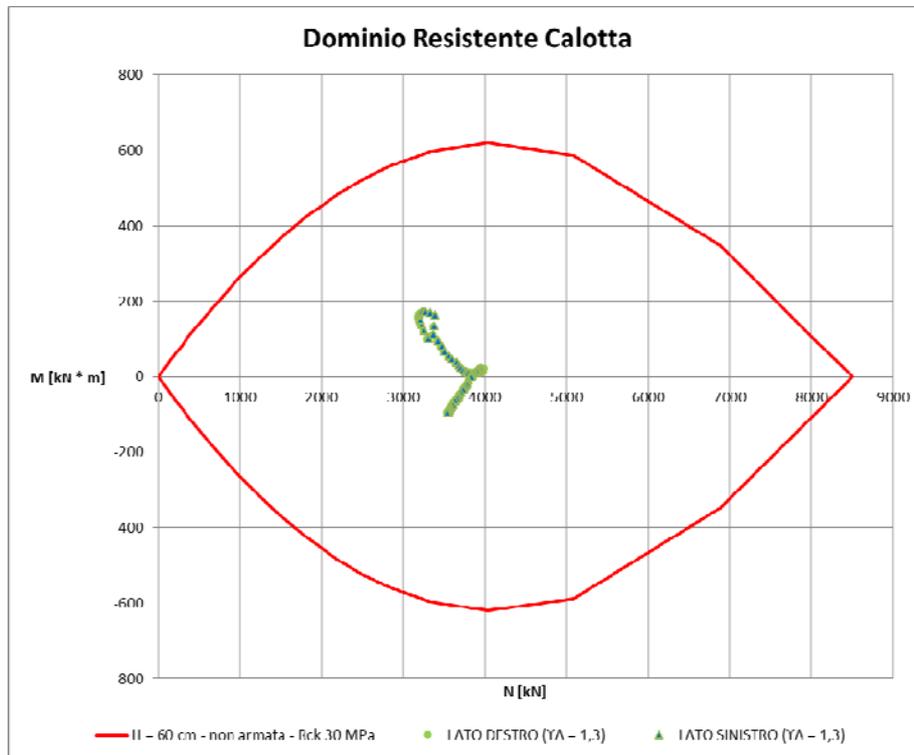
Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

## Calotta – H = 60 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Rene sx</i>	3044	16
<i>Rene dx</i>	3037	14
<i>Chiave</i>	2720	-72

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  3044 kN  
 M<sub>xEd</sub>  16 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

$\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm<sup>2</sup>  $\epsilon_{cu}$   ‰  
 $E_s$   N/mm<sup>2</sup>  $f_{cd}$   ‰  
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ?  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$   ‰  
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm<sup>2</sup>  $\tau_{co}$    
 $\tau_{c1}$

$\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{ci}$   ‰

Verifica N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  3037 kN  
 M<sub>xEd</sub>  14 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

$\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm<sup>2</sup>  $\epsilon_{cu}$   ‰  
 $E_s$   N/mm<sup>2</sup>  $f_{cd}$   ‰  
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ?  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$   ‰  
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm<sup>2</sup>  $\tau_{co}$    
 $\tau_{c1}$

$\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{ci}$   ‰

Verifica N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n   
 N<sub>Ed</sub>  2720 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -72 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C25/30	
E <sub>su</sub>	67.5 ‰	E <sub>c2</sub>	2 ‰
f <sub>yd</sub>	391.3 N/mm <sup>2</sup>	E <sub>cu</sub>	3.5 ‰
E <sub>s</sub>	200.000 N/mm <sup>2</sup>	f <sub>cd</sub>	14.17
E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>	15	f <sub>cc</sub> /f <sub>cd</sub>	0.8 ?
ε <sub>syd</sub>	1.957 ‰	σ <sub>c,adm</sub>	9.75
σ <sub>s,adm</sub>	255 N/mm <sup>2</sup>	τ <sub>co</sub>	0.6
		τ <sub>c1</sub>	1.829

σ<sub>c</sub>  N/mm<sup>2</sup>

Verifica

N° iterazioni:

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

## 2.2 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	250
	$\varphi'$	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	300	300
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B2.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una condizione di copertura pari a 80 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

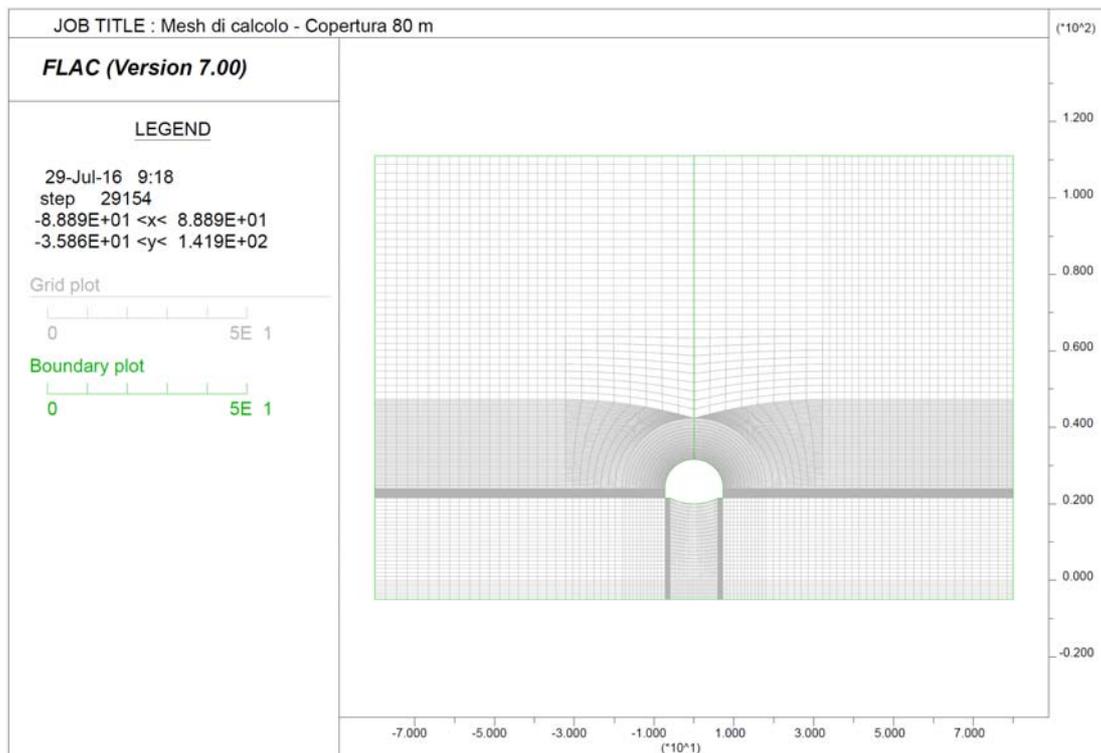
Il prerinvestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

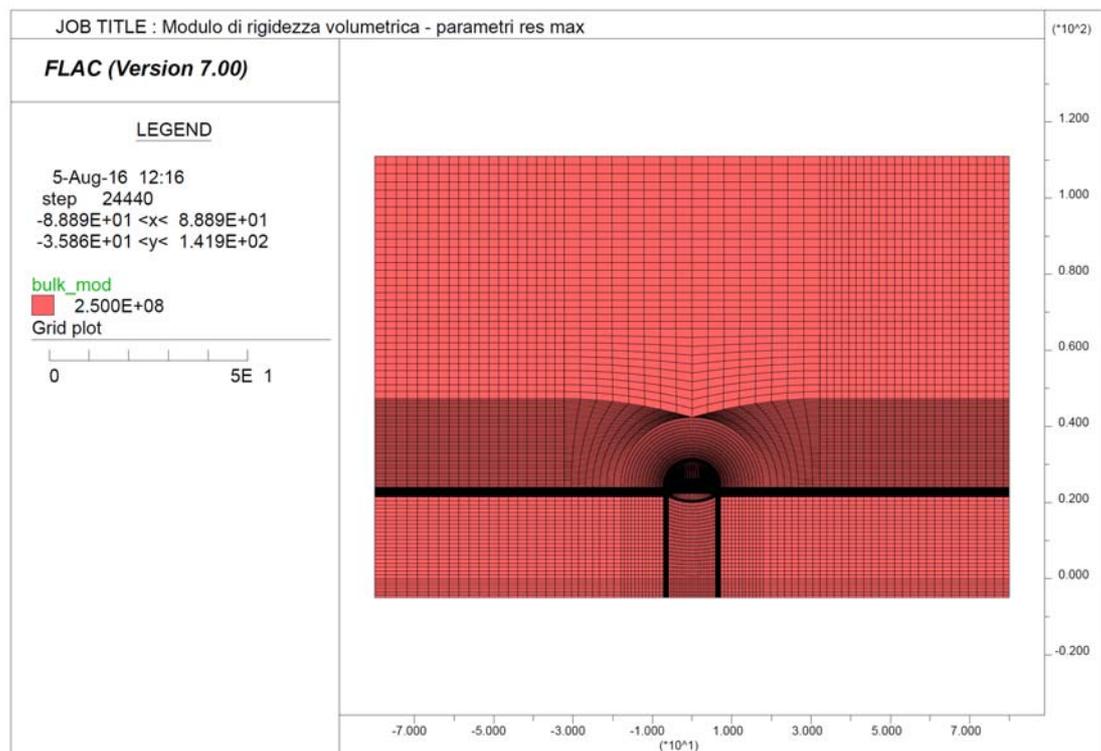
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

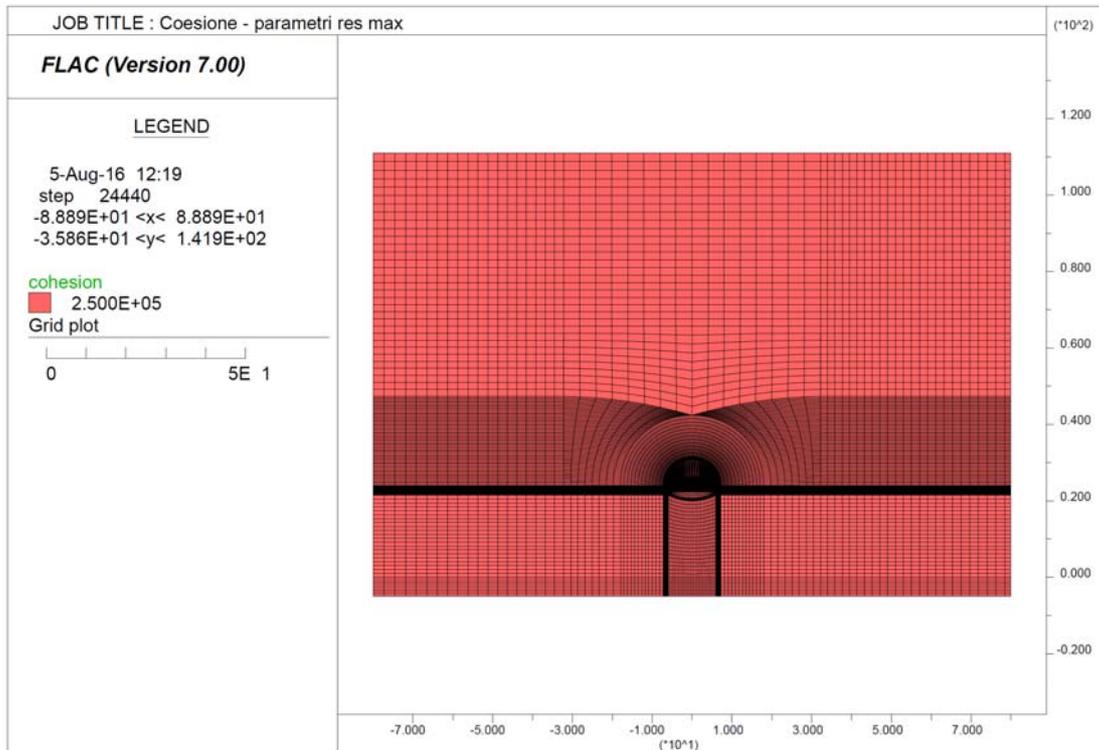
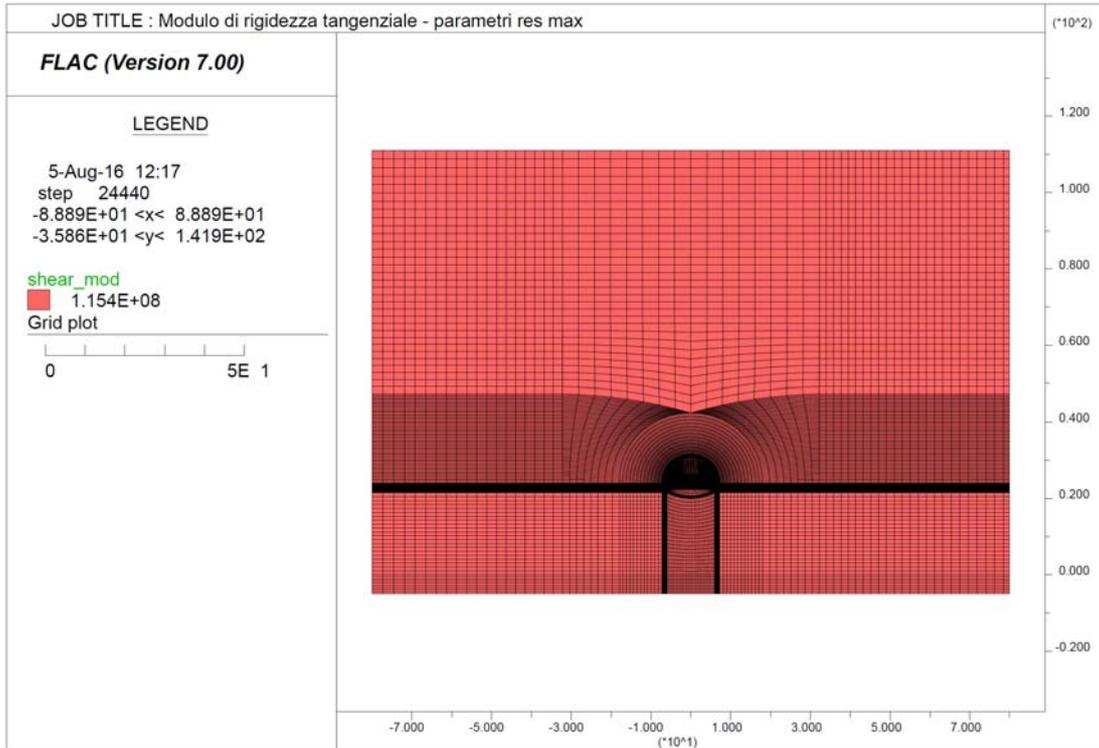
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

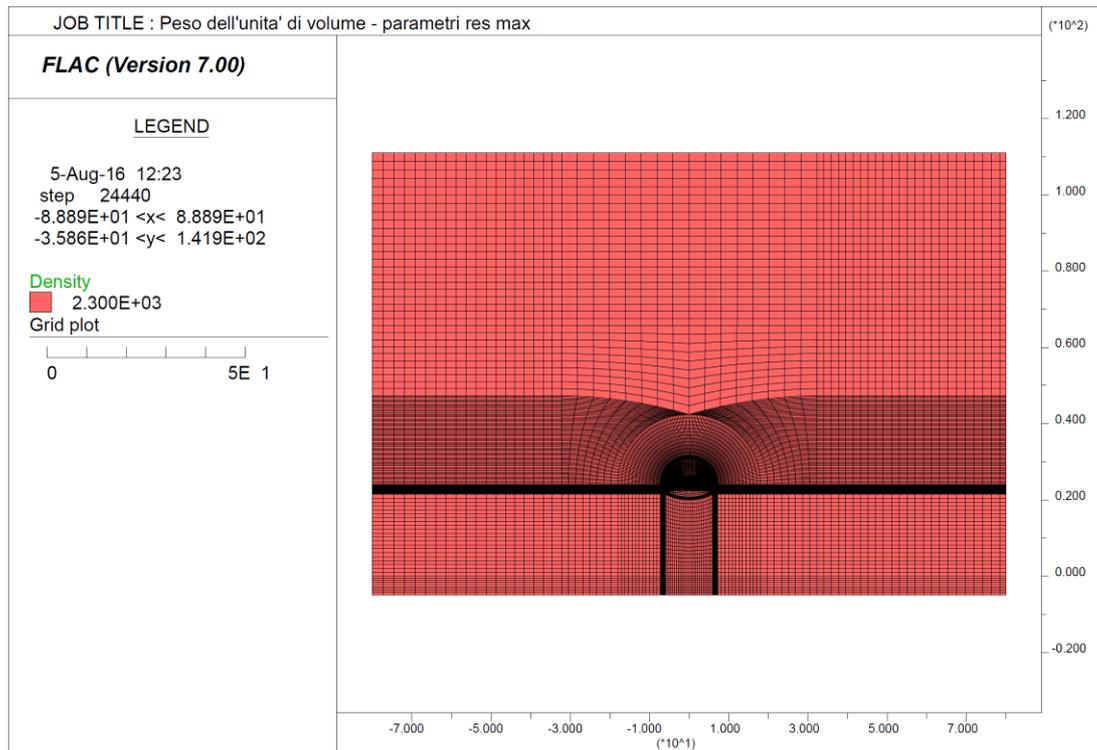
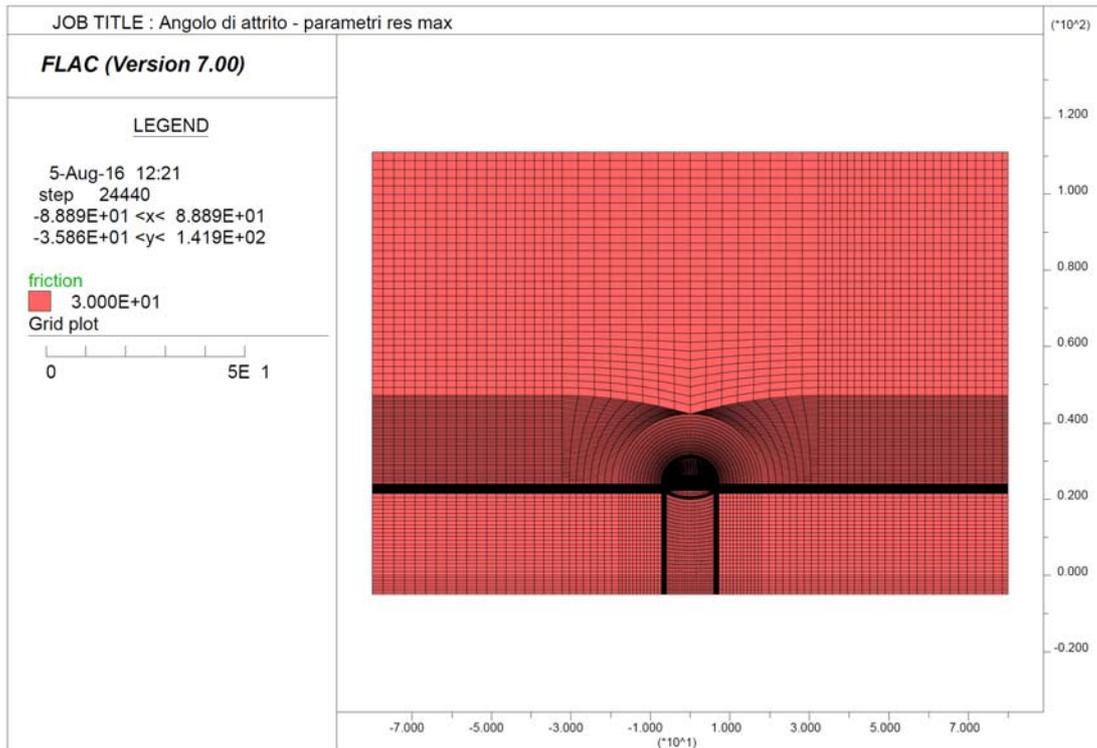
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo B2 - parametri res max - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	75,5%	2,89	-
Step 3	Scavo	1	78,9%	0,42*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	78,9%	0,42*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	92,2%	1,17*	0,76
Step 6	Avanzamento 2 D ( E SB = 31 Gpa)	29	97,1%	1,54*	1,12
Step 7	Getto arco rovescio e muretta a 2D e avanzamento fino a deformazioni esaurite	-	100,0%	-	1,12
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	1,12
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	1,12

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

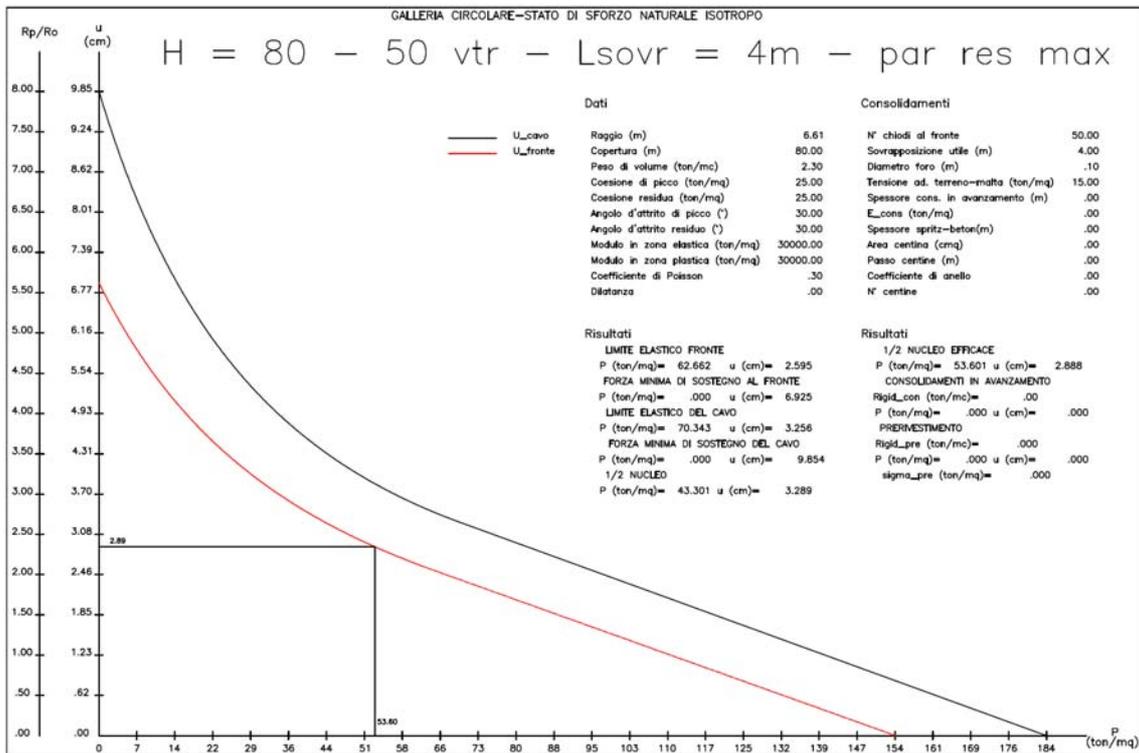
### 2.2.1 Fasi di calcolo

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il pririvestimento e per il rivestimento definitivo.

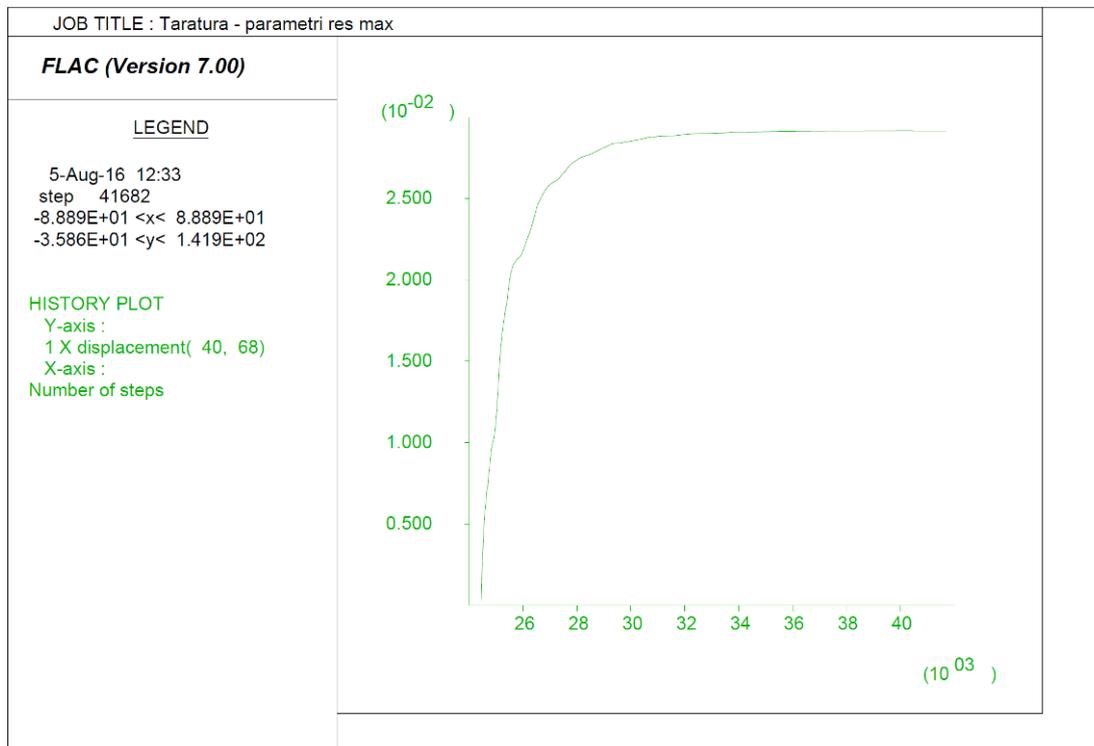
Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

Fase 1 In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

Fase 2 Questa fase, generalmente indicata come fase di taratura del modello, consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo. Il contributo statico fornito dalla porzione di ammasso oltre il fronte non ancora scavato viene simulato rilasciando il 75.5% delle forze di scavo. Tale valore è stato tarato sulla base delle indicazioni fornite dalle curve caratteristiche che, per il caso in analisi, indica una preconvergenza massima di circa 2.89 cm così come evidente dalla curva caratteristica riportata sotto.



L'output del programma di calcolo FLAC riporta lo spostamento del cavo in corrispondenza di questo step di calcolo sul piedritto sx del modello.



Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della certina (fattore di rilascio pari a 0.789)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 180 / 100) con spritz beton (25 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.789)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a  $\frac{1}{2}$  D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton ( $E = 10$  GPa) (fattore di rilascio = 0.922)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino a 2 D (fattore di rilascio = 0.971).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1.00)

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

#### *2.2.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti*

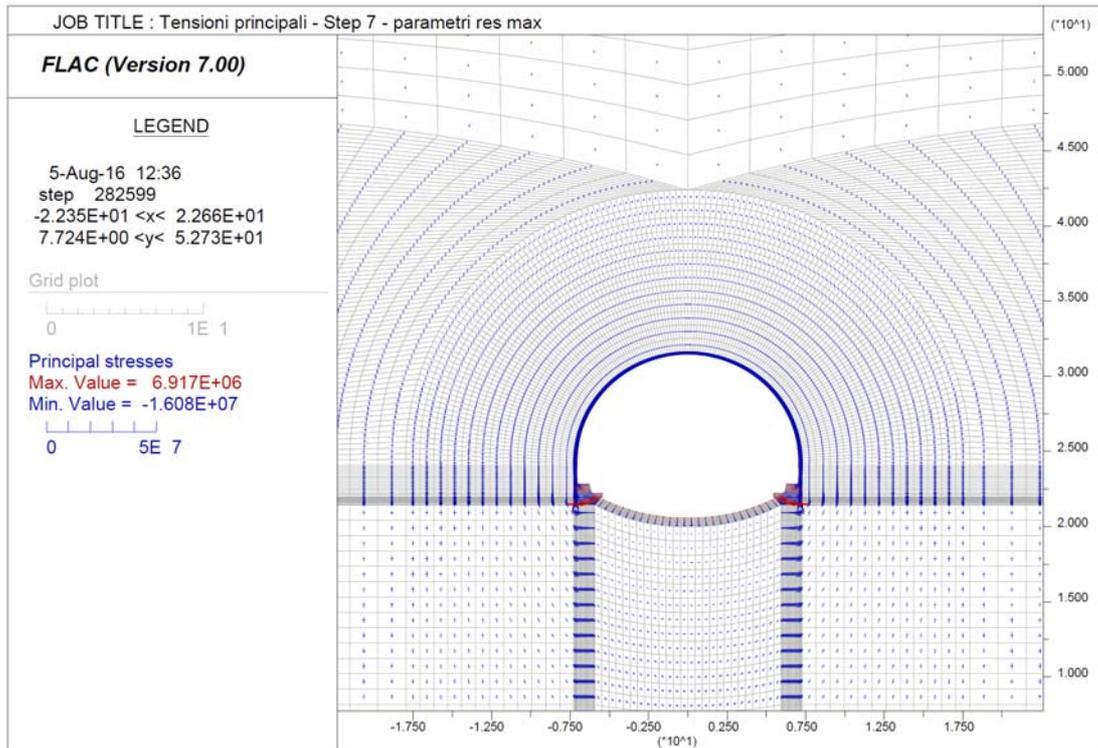
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

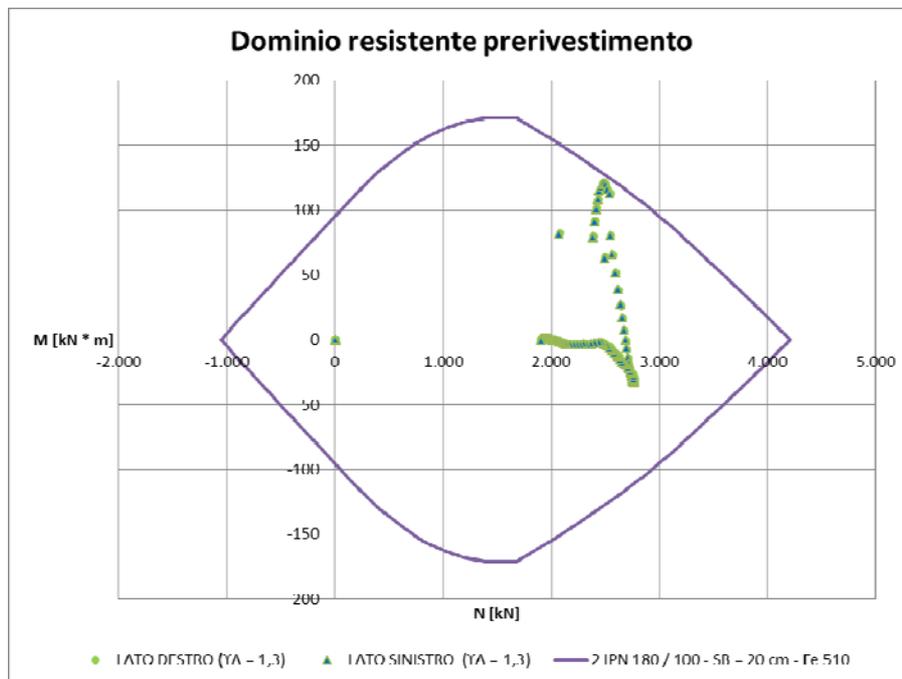
##### *2.2.1.1.1 Rivestimento di prima fase*

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 180 / 100 – SB = 20 cm).



Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	20	1	17,056	1
			2	17,056	19

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 2720 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -72 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura  
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Tipo flessione  
 Retta  Deviata

N° rett. 100

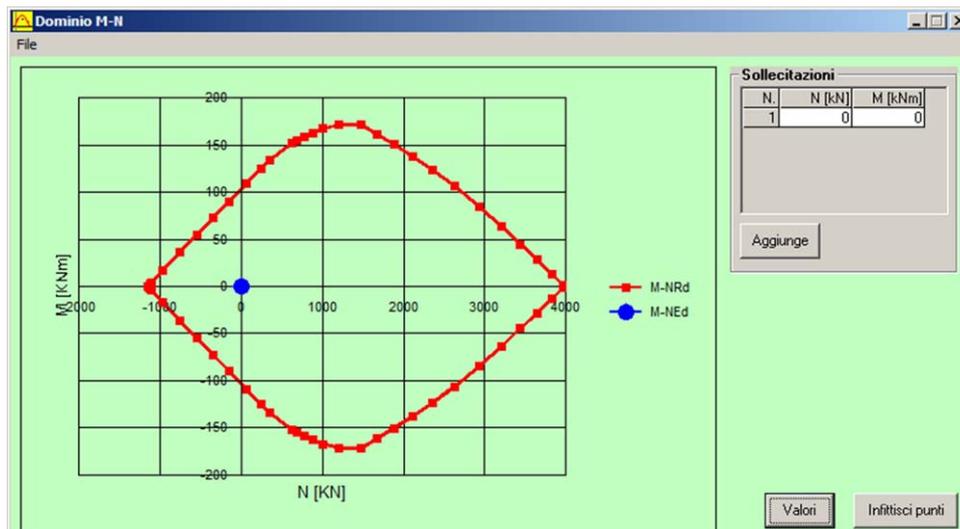
Calcola MRd Dominio M-N  
 L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello

Precompresso

Materiali

Fe510	C25/30
$\epsilon_{su}$ 67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 338.1 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3.5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 14.17
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0.8
$\epsilon_{syd}$ 1.691 ‰	$G_{c,adm}$ 9.75
$\sigma_{s,adm}$ 240 N/mm²	$\tau_{co}$ 0.6
	$\tau_{c1}$ 1.829

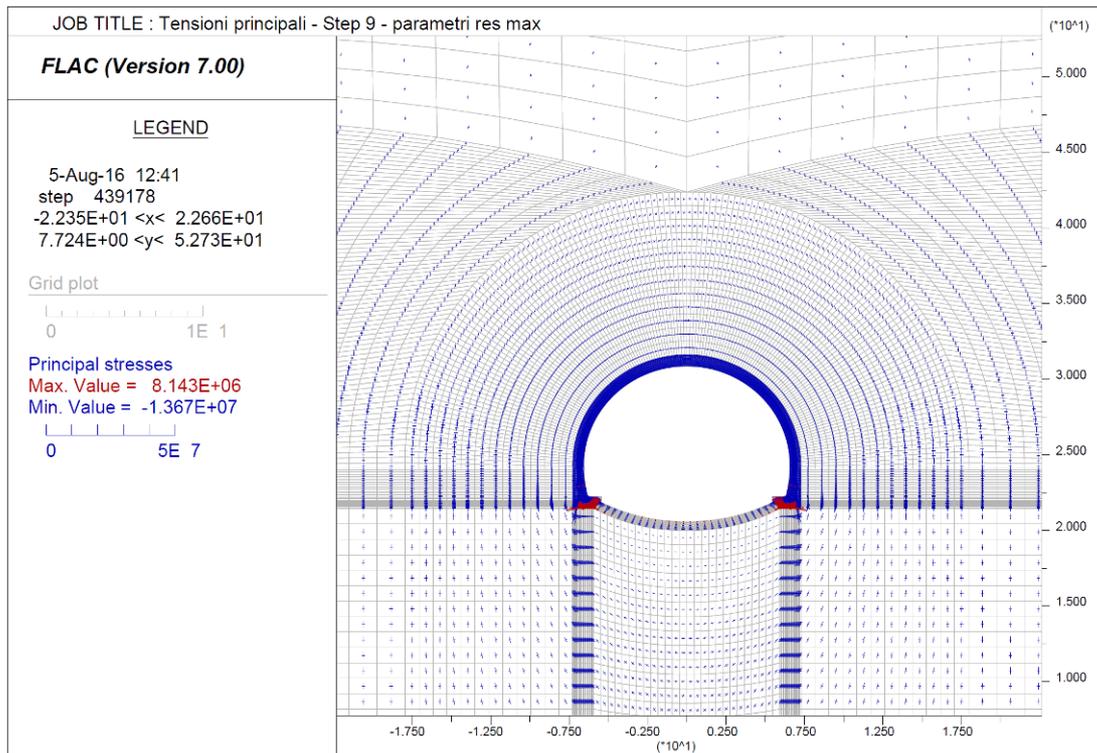
M<sub>xRd</sub> 104.4 kNm  
 $\sigma_c$  -14.17 N/mm²  
 $\epsilon_c$  3.5 ‰  
 $\epsilon_s$  40.55 ‰  
 d 19 cm  
 x 1.51 x/d 0.07945  
 $\delta$  0.7



### 2.2.1.1.2 Rivestimento definitivo

Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase).

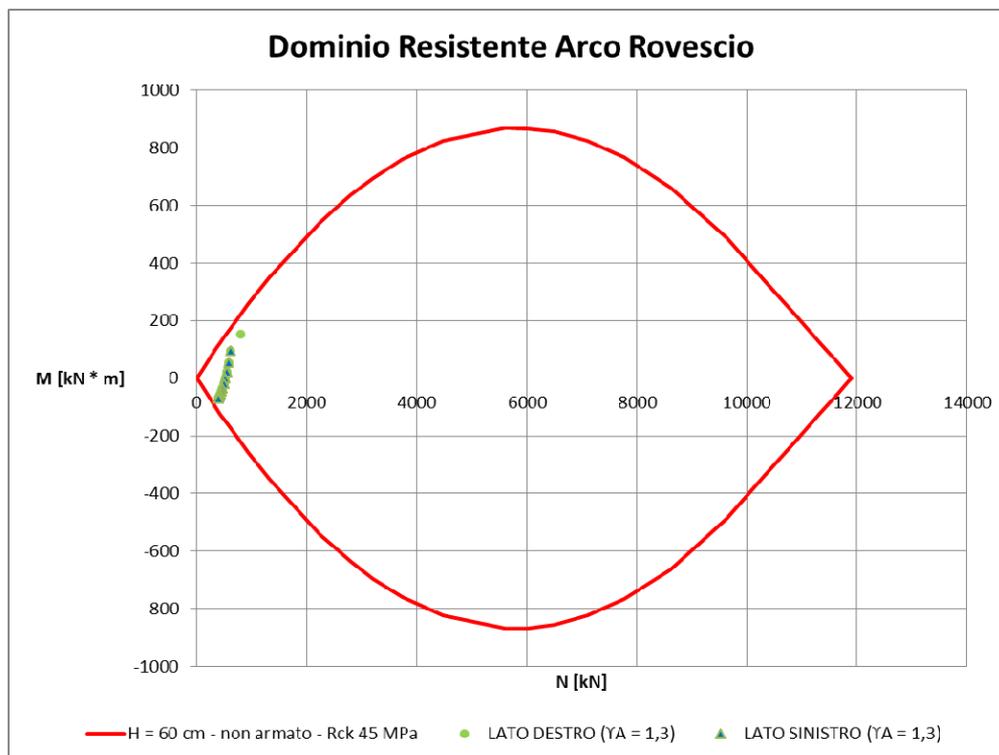
La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



**Arco rovescio - H = 60 cm**

**Verifica SLU**

**Momento flettente**



## Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punte tensionali
- Stato limite di fessurazione

### ***Verifica nei confronti delle Punte tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	477	74
<i>Muretta dx</i>	475	73
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	310	-54

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

TITOLO :

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 477 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 74 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C35/45
$\epsilon_{su}$ 67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391,3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3,5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 19,83
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0,8
$\epsilon_{syd}$ 1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 13,5
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²	$\tau_{co}$ 0,8
	$\tau_{c1}$ 2,257

$\sigma_c$  -2,195 N/mm²  
 $\sigma_s$  0,365 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0,04183 ‰  
 d 54,5 cm  
 x 43,46 w/d 0,7974  
 $\delta$  1

Verifica  
 N° iterazioni: 4  
 Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

TITOLO :

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 475 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 73 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C35/45
$\epsilon_{su}$ 67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391,3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3,5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 19,83
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0,8
$\epsilon_{syd}$ 1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 13,5
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²	$\tau_{co}$ 0,8
	$\tau_{c1}$ 2,257

$\sigma_c$  -2,164 N/mm²  
 $\sigma_s$  7,844 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0,03922 ‰  
 d 54,5 cm  
 x 43,89 w/d 0,8054  
 $\delta$  1

Verifica  
 N° iterazioni: 4  
 Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ X

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	0	5,5
			2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  310 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -54 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Verifica

N° iterazioni:

Precompresso

**Materiali**

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391,3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3,5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	19,83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0,8
$\epsilon_{syd}$	1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13,5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0,8
		$\tau_{cl}$	2,257

$\sigma_c$  -1,643 N/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_s$  10,94 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_s$  0,05471 ‰  
 d 54,5 cm  
 x 37,74 x/d 0,6925  
 $\delta$  1

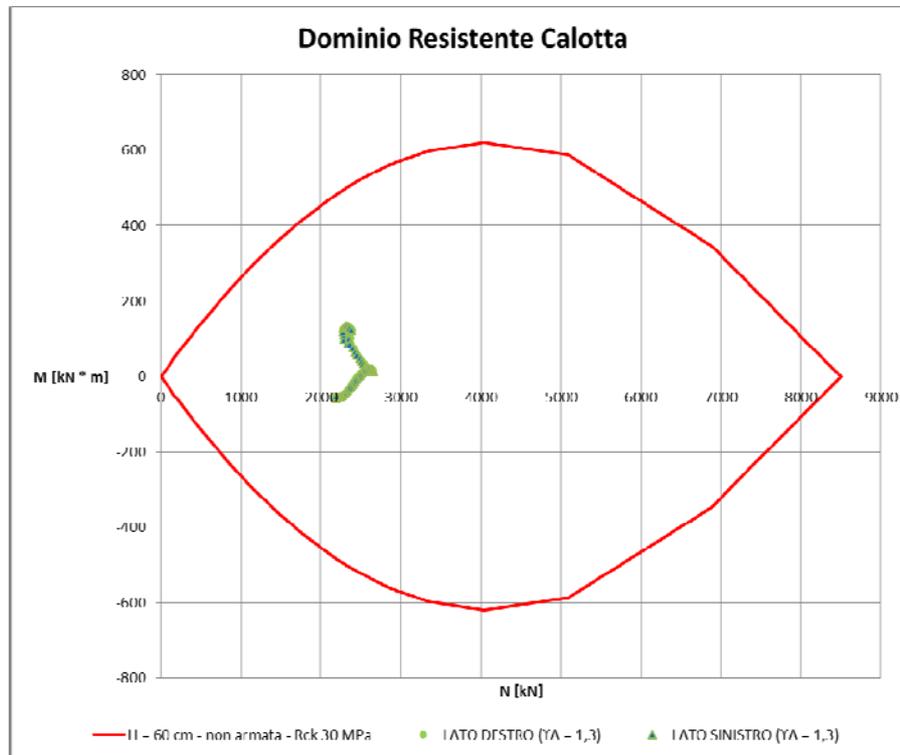
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione della muretta destra dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 600 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 545 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 545 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 55 [mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{f,1}$ = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{f,1}$ = 1 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,1}$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{f,2}$ = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{f,2}$ = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,2}$ = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	$f_{ck}$ = 35 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	$f_{ctm}$ = 3,2 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	$E_{cm}$ = 34077 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$ = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	$E_s$ = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	$\sigma_s$ = 10,94 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 377,4 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	$\alpha_e$ = 5,87 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	$A_s$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	$A_{c,eff,1}$ = 137500 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,2}$ = 74200 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,3}$ = 300000 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,min}$ = 74200 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	$\rho_{p,eff}$ = 0,00004 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	$f_{ct,eff}$ = 3,2 [MPa]
Fattore di durata del carico	$k_f$ = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{min}$ = 0,000033 [-]
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{calc.}$ = -0,151613 [-]
	<b><math>[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]</math> = 0,000033 [-]</b>
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	$\phi_{eq}$ = 1,00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	$s_{max,nif}$ = 277,5 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	$k_1$ = 0,800 [-] $k_2$ = 0,500 [-] $k_3$ = 3,400 [-] $k_4$ = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	$s_{r,max,1}$ = 4202 [mm]
	$s_{r,max,2}$ = 289 [mm]
	<b><math>s_{r,max}</math> = 4202 [mm]</b>
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	$w_{k,lim}$ = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b><math>w_k</math> = 0,14 [mm]</b>

## Calotta – H = 60 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

#### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Rene sx</i>	2015	16
<i>Rene dx</i>	2019	16
<i>Chiave</i>	1683	-42

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  2015 kN  
 M<sub>xEd</sub>  16 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C  C25/30

$\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm²  $\epsilon_{cu}$   ‰  
 $E_s$   N/mm²  $f_{cd}$   ‰  
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ?  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$   N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm²  $\tau_{co}$   ‰  
 $\tau_{c1}$   ‰

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\epsilon_{ci}$   ‰

Verifica N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  2019 kN  
 M<sub>xEd</sub>  16 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C  C25/30

$\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm²  $\epsilon_{cu}$   ‰  
 $E_s$   N/mm²  $f_{cd}$   ‰  
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ?  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$   N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm²  $\tau_{co}$   ‰  
 $\tau_{c1}$   ‰

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\epsilon_{ci}$   ‰

Verifica N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	0	5,5
			2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  1683 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -42 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN  yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C25/30	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm²	$f_{cd}$	14.17
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8 ?
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9.75
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm²	$\tau_{co}$	0.6
		$\tau_{c1}$	1.829

$\sigma_c$  -3.505 N/mm²  
 $\epsilon_{ci}$  -0.1675 ‰

Verifica  
 N° iterazioni:

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

### 2.3 Sezione tipo B0 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	250
	$\varphi'$	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	300	300
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B0.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una condizione di copertura pari a 80 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

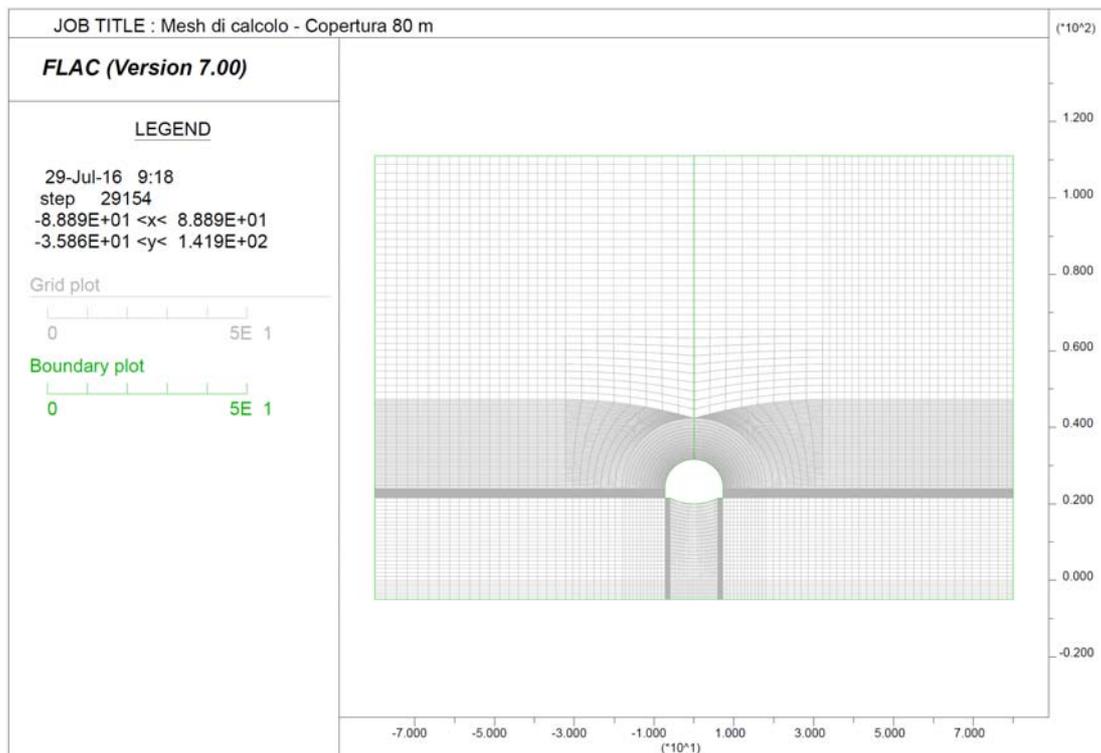
Il prerinvestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

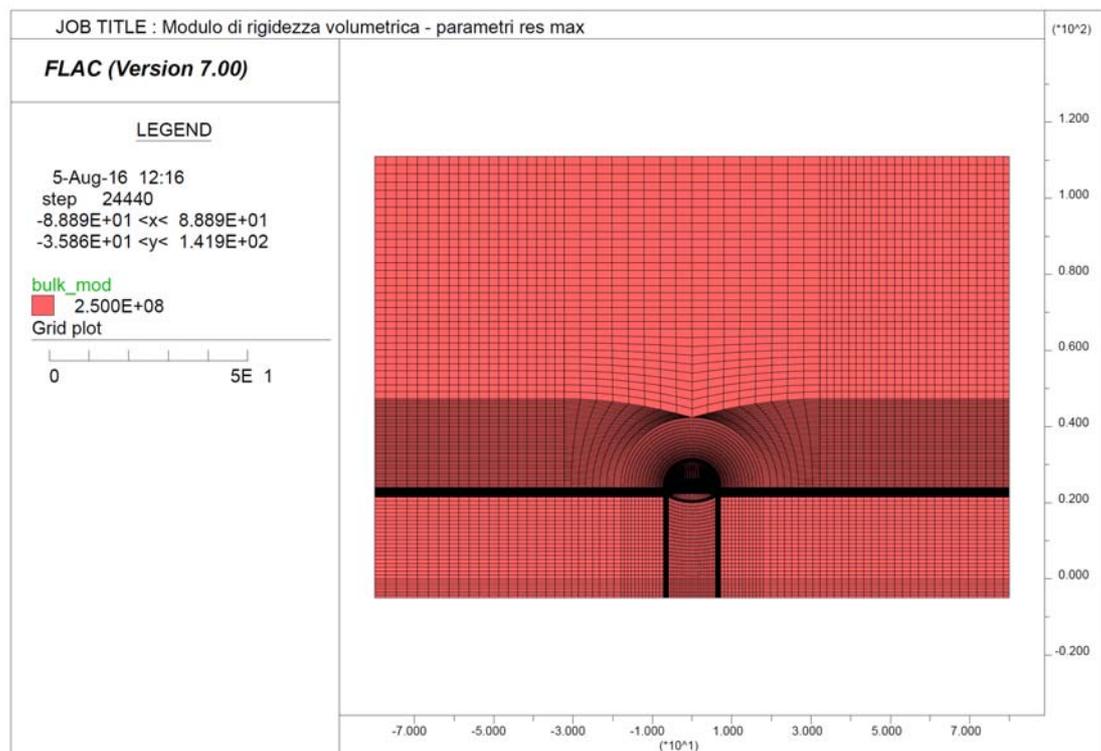
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

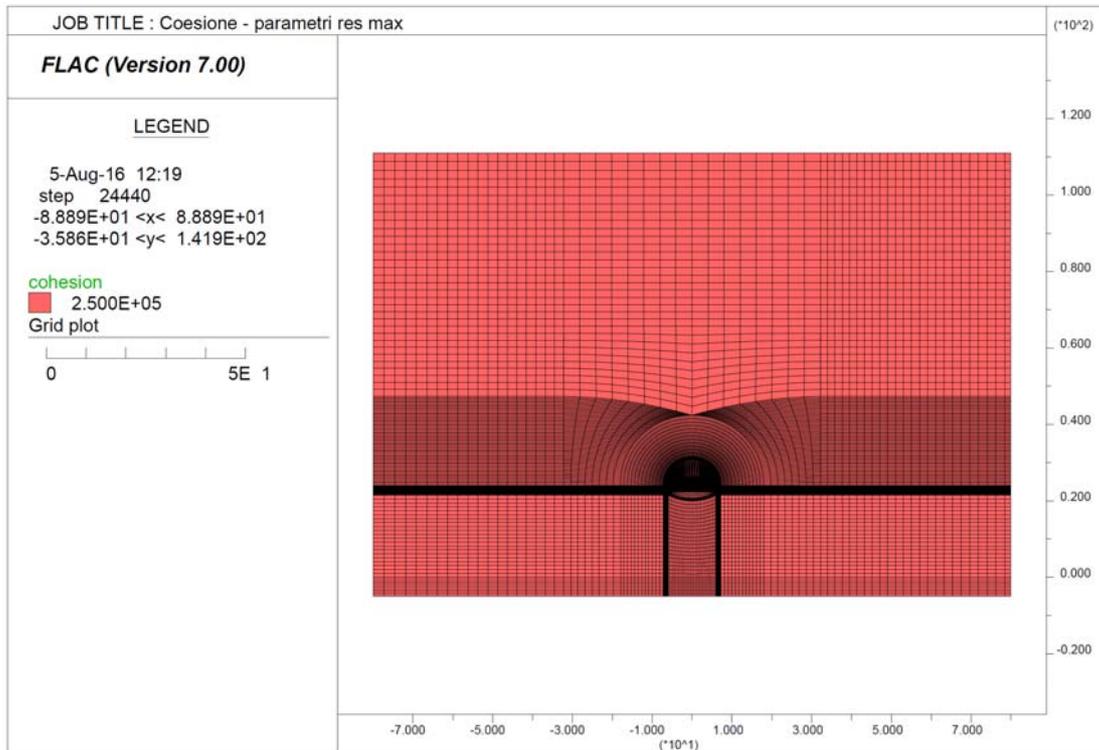
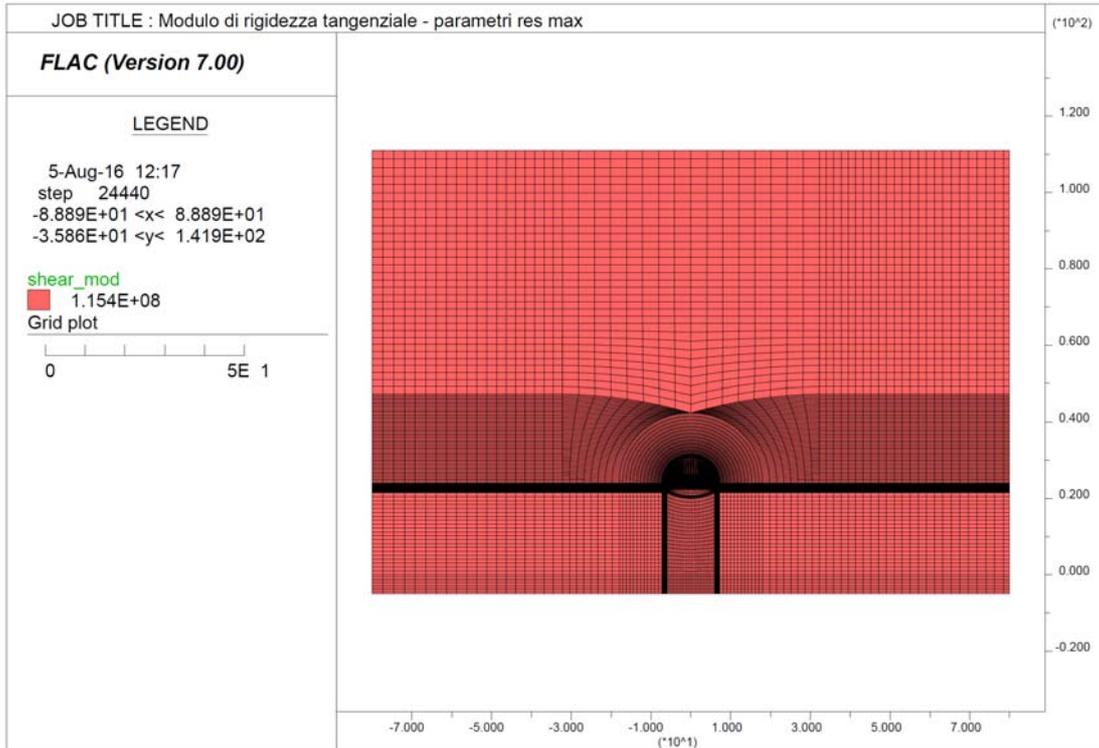
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

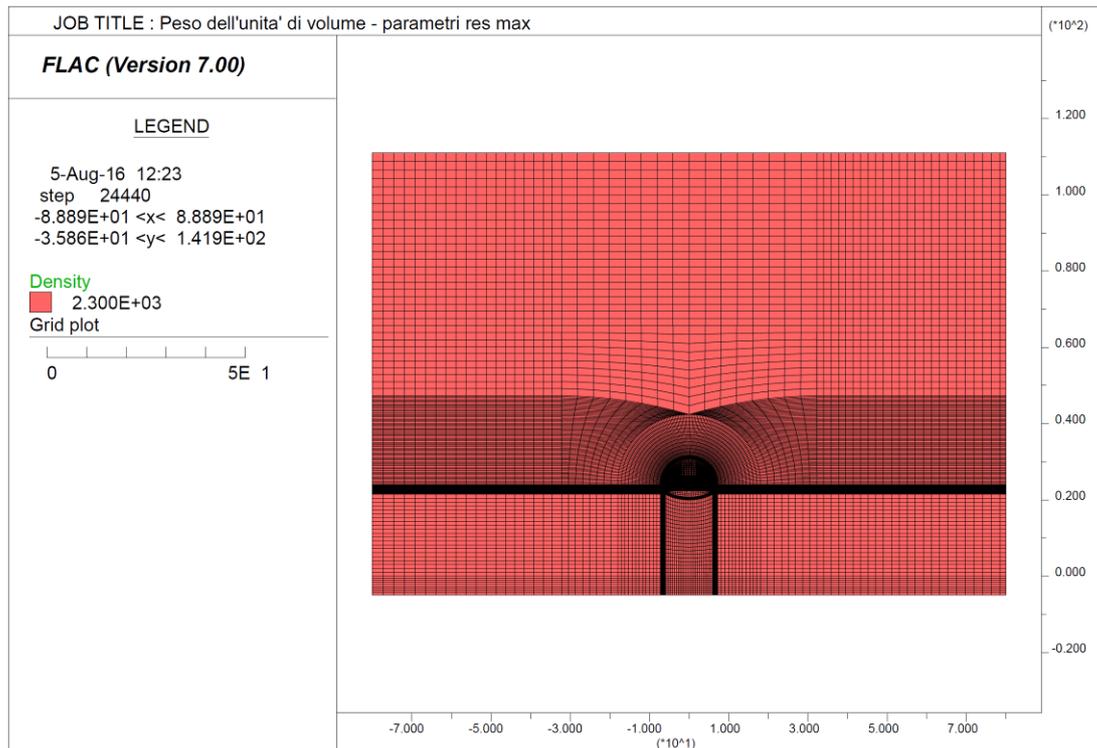
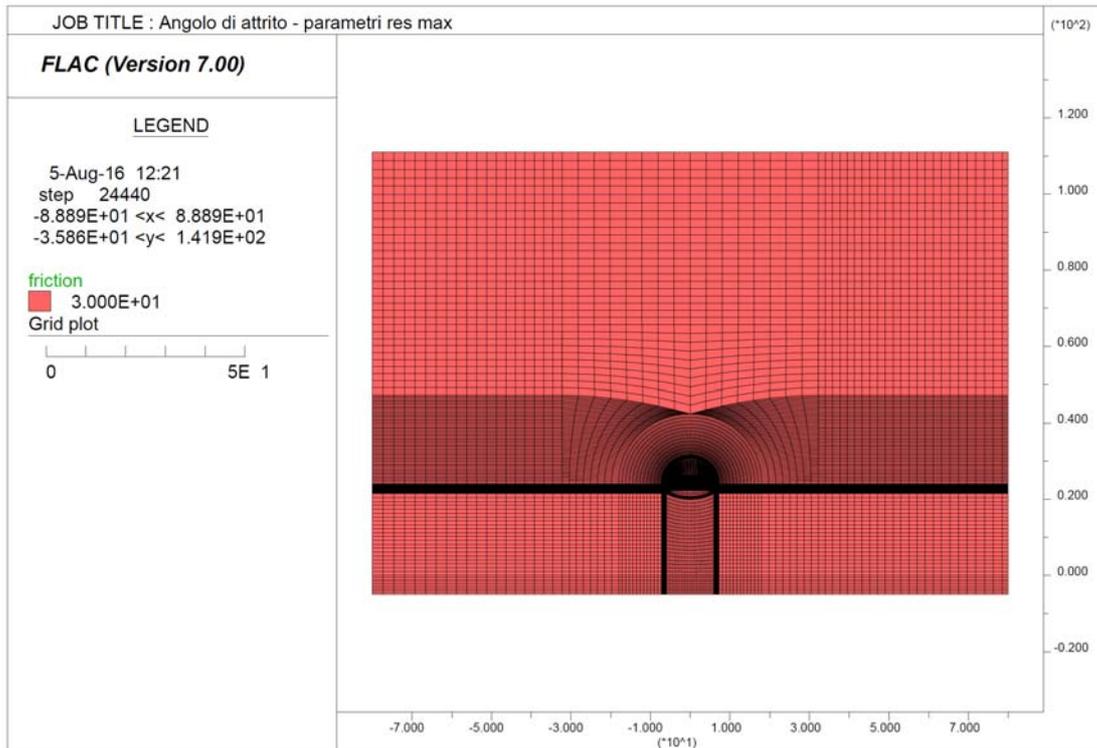
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo B0 - parametri res max - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	78,5%	3,29	-
Step 3	Scavo	1	81,4%	0,37*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	81,4%	0,37*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	93,1%	1,09*	0,72
Step 6	Avanzamento fino a deformazioni esaurite ( E SB = 31 Gpa)	-	100,0%	1,67*	1,3
Step 7	Getto arco rovescio e muretta	-	100,0%	-	1,3
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	1,3
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	1,3

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

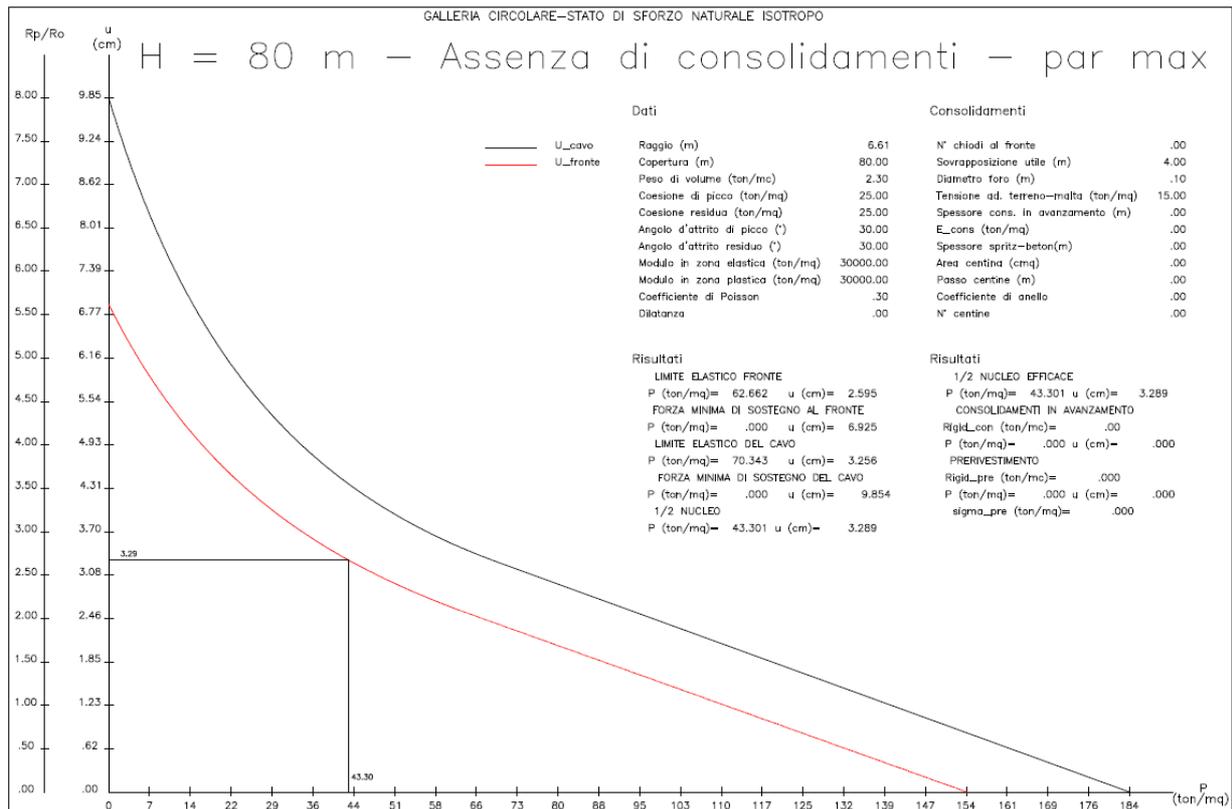
### 2.3.1 Fasi di calcolo

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il priverivestimento e per il rivestimento definitivo.

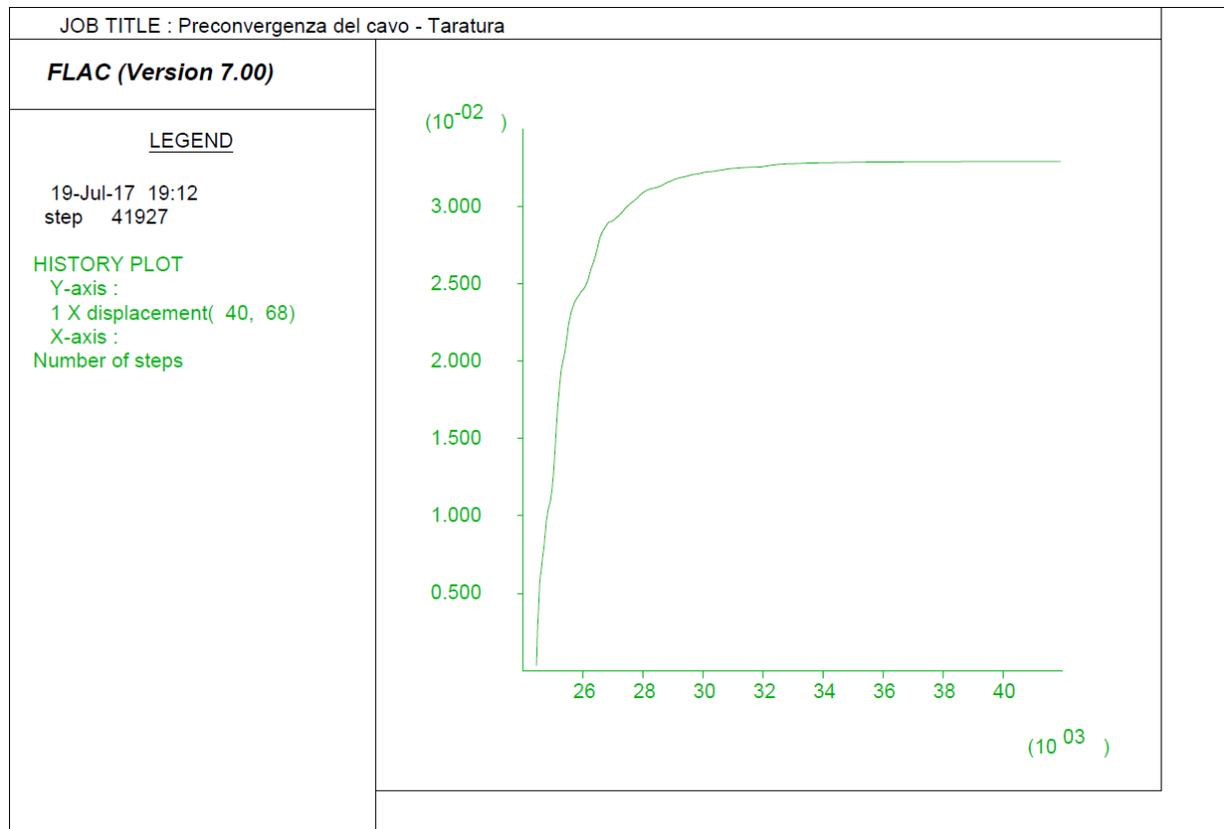
Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

Fase 1 In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

Fase 2 Questa fase, generalmente indicata come fase di taratura del modello, consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo. Il contributo statico fornito dalla porzione di ammasso oltre il fronte non ancora scavato viene simulato rilasciando il 78.5% delle forze di scavo. Tale valore è stato tarato sulla base delle indicazioni fornite dalle curve caratteristiche che, per il caso in analisi, indica una preconvergenza massima di circa 3.29 cm così come evidente dalla curva caratteristica riportata sotto.



L'output del programma di calcolo FLAC riporta lo spostamento del cavo in corrispondenza di questo step di calcolo sul piedritto sx del modello.



Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.814)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 180 / 100) con spritz beton (20 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.814)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a  $\frac{1}{2}$  D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton ( $E = 10$  GPa) (fattore di rilascio = 0.931)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1.00).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

#### *2.3.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti*

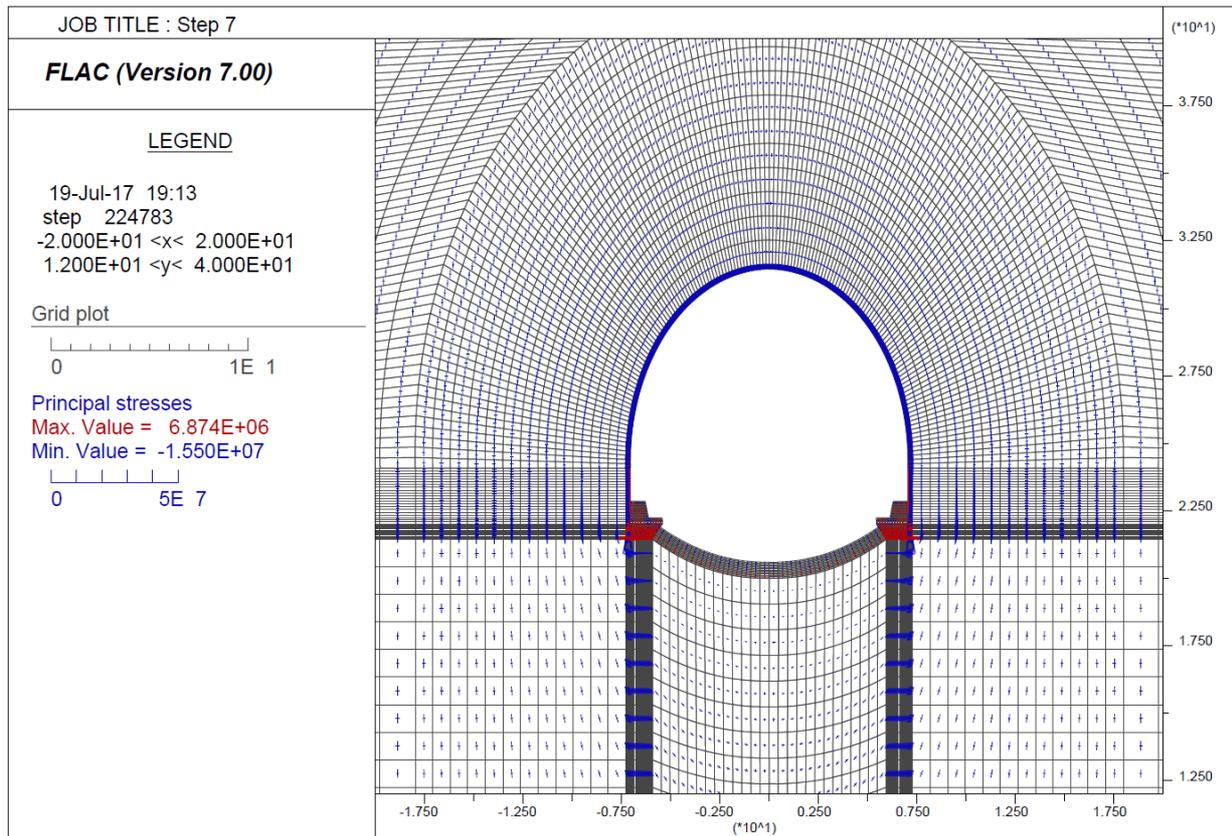
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

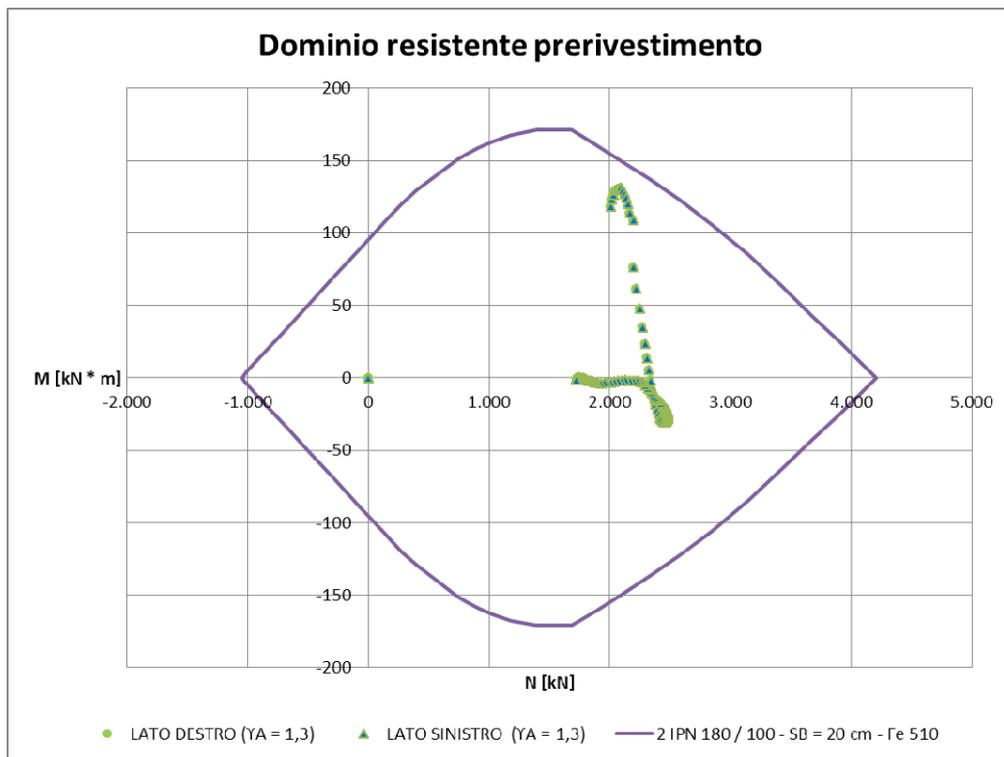
##### *2.3.1.1.1 Rivestimento di prima fase*

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

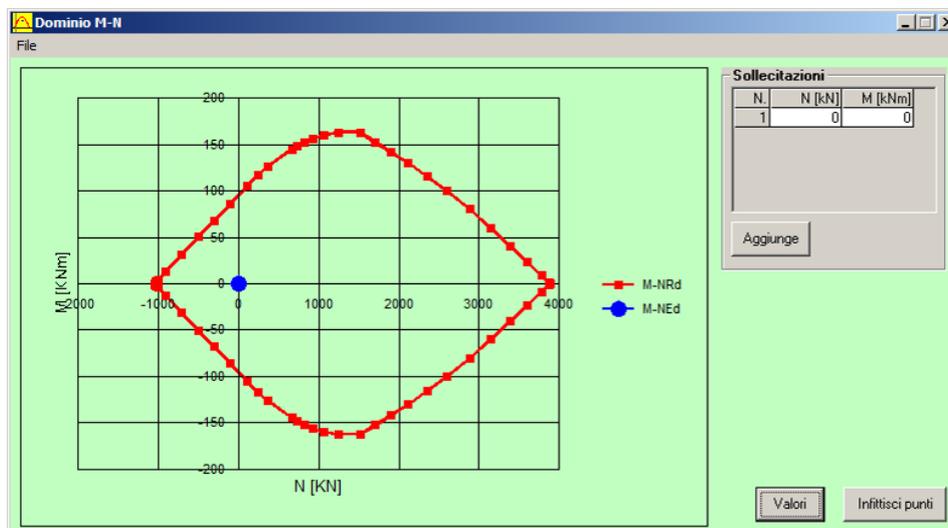
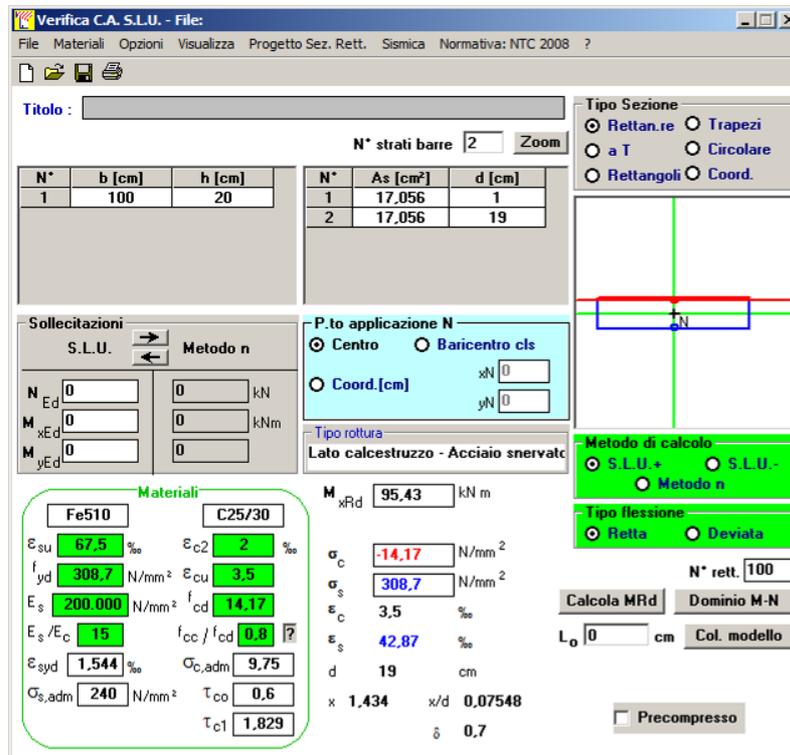
I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 180 / 100 – SB = 20 cm).



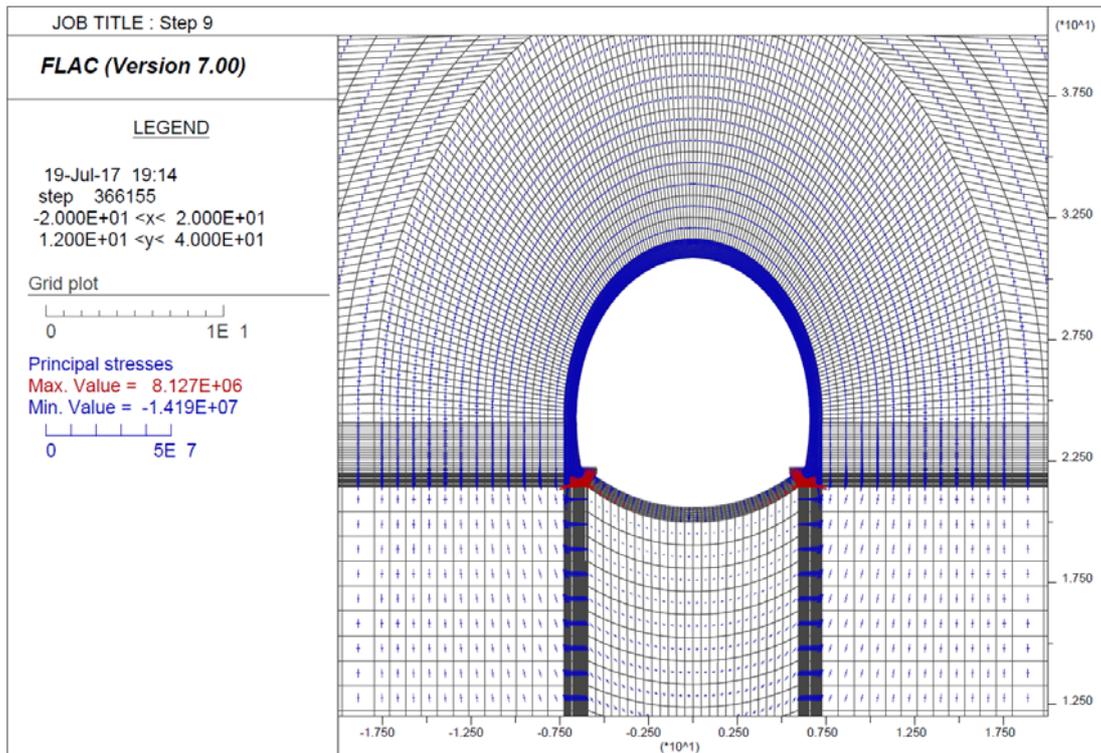
Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.



### 2.3.1.1.2 Rivestimento definitivo

Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase).

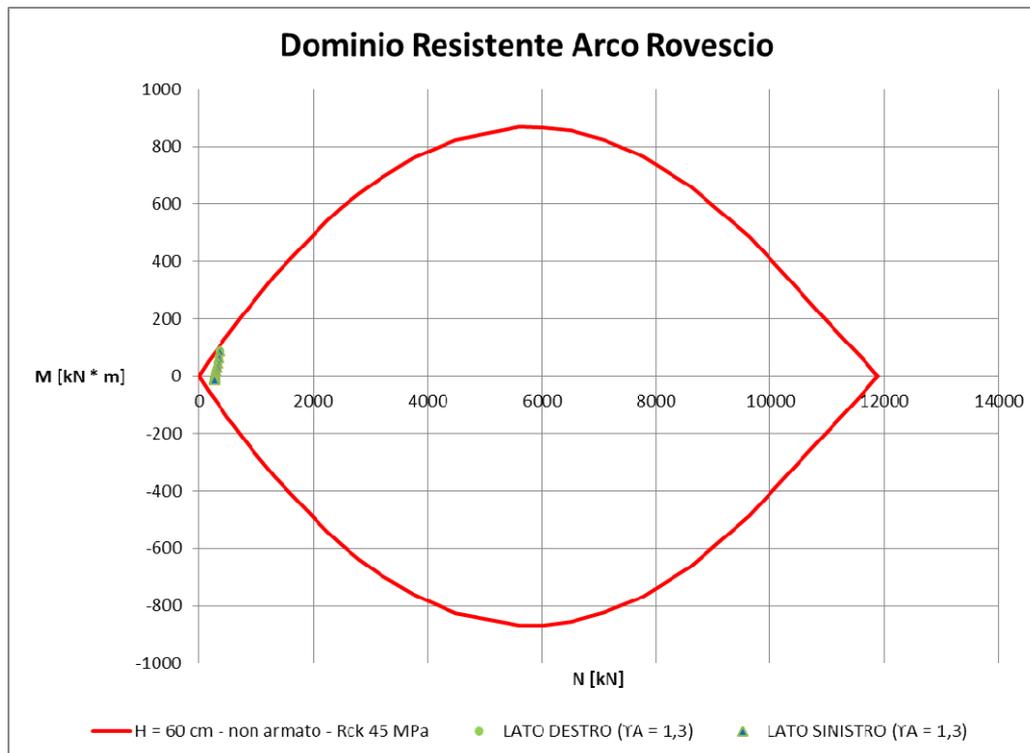
La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



**Arco rovescio - H = 60 cm**

**Verifica SLU**

**Momento flettente**



## Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punte tensionali
- Stato limite di fessurazione

### ***Verifica nei confronti delle Punte tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	261	50
<i>Muretta dx</i>	260	50
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	203	-9

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ X

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	0	5,5
			2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 261 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 50 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19.83 N/mm²  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8 ?  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13.5 N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.8  
 $\tau_{cl}$  2.257

$\sigma_c$  -1.605 N/mm²  
 $\sigma_s$  16.26 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.08129 ‰  
 d 54.5 cm  
 x 32.53 x/d 0.5969  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 5

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ X

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	0	5,5
			2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 260 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 50 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19.83 N/mm²  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8 ?  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13.5 N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.8  
 $\tau_{cl}$  2.257

$\sigma_c$  -1.61 N/mm²  
 $\sigma_s$  16.58 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.08292 ‰  
 d 54.5 cm  
 x 32.31 x/d 0.5928  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 5

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettang. re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 203 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -9 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	19.83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8 ?
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13.5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0.8
		$\tau_{c1}$	2.257

$\sigma_c$  -0.4883 N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_s$  -0.01619 ‰

Verifica

N° iterazioni: 0

Precompresso

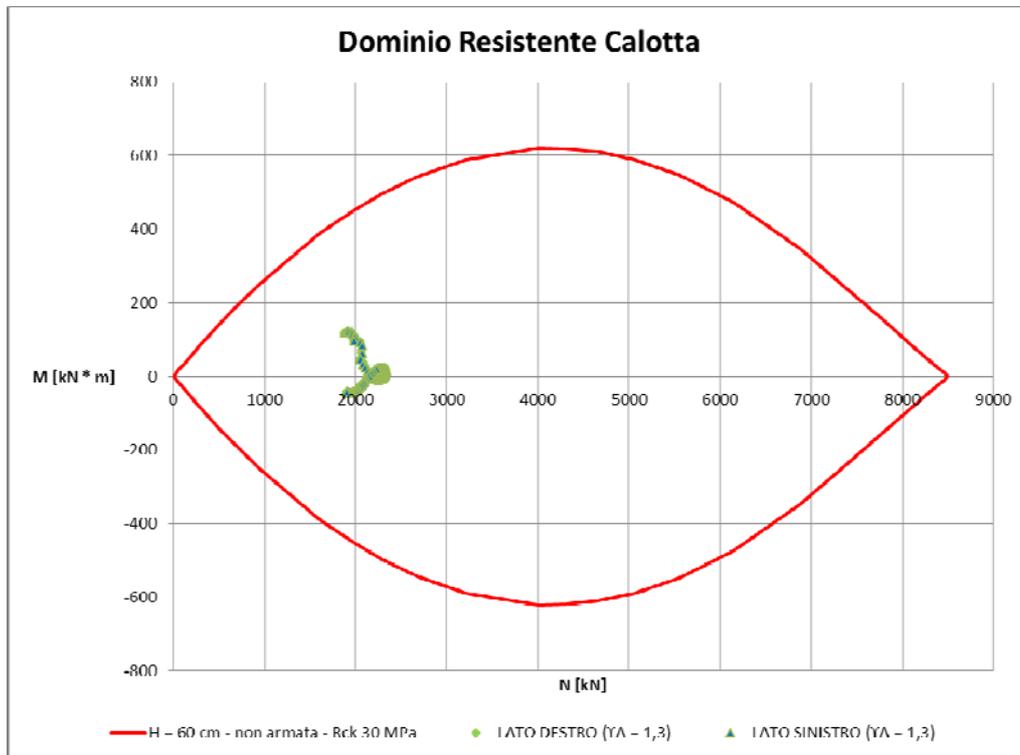
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione della muretta destra dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 600 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 545 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 545 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 47 [mm]
<a href="#">Armatura tesa ordinaria</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,1</sub> = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>r,1</sub> = 1 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,1</sub> = 3 [mm <sup>2</sup> ]
<a href="#">Armatura tesa di infittimento</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,2</sub> = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>r,2</sub> = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,2</sub> = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	f <sub>ck</sub> = 35 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub> = 3,2 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub> = 34077 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub> = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub> = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub> = 16,58 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 323,1 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	α <sub>e</sub> = 5,87 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	A <sub>s</sub> = 3 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	A <sub>c,eff.1</sub> = 137500 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.2</sub> = 92300 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.3</sub> = 300000 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.min</sub> = 92300 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>p,eff</sub> = 0,00003 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub> = 3,2 [MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub> = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	[ε <sub>sm</sub> - ε <sub>cm</sub> ] <sub>min</sub> = 0,000050 [-]
	[ε <sub>sm</sub> - ε <sub>cm</sub> ] <sub>calc.</sub> = -0,188572 [-]
	<b>[ε<sub>sm</sub> - ε<sub>cm</sub>] = 0,000050 [-]</b>
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	φ <sub>eq</sub> = 1,00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub> = 237,5 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub> = 0,800 [-] k <sub>2</sub> = 0,500 [-] k <sub>3</sub> = 3,400 [-] k <sub>4</sub> = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	s <sub>r,max.1</sub> = 5154 [mm]
	s <sub>r,max.2</sub> = 360 [mm]
	<b>s<sub>r,max</sub> = 360 [mm]</b>
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	w <sub>k,lim</sub> = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b>w<sub>k</sub> = 0,02 [mm]</b>

## Calotta – H = 60 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

#### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Rene sx</i>	1783	18
<i>Rene dx</i>	1783	18
<i>Chiave</i>	1465	-33

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ X

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N Ed   kN  
 M xEd   kNm  
 M yEd

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C25/30
$\epsilon_{su}$ <input type="text" value="67.5"/> ‰	$\epsilon_{c2}$ <input type="text" value="2"/> ‰
$f_{yd}$ <input type="text" value="391.3"/> N/mm²	$\epsilon_{cu}$ <input type="text" value="3.5"/> ‰
$E_s$ <input type="text" value="200.000"/> N/mm²	$f_{cd}$ <input type="text" value="14.17"/>
$E_s/E_c$ <input type="text" value="15"/>	$f_{cc}/f_{cd}$ <input type="text" value="0.8"/> ?
$\epsilon_{syd}$ <input type="text" value="1.957"/> ‰	$\sigma_{c,adm}$ <input type="text" value="9.75"/>
$\sigma_{s,adm}$ <input type="text" value="255"/> N/mm²	$\tau_{co}$ <input type="text" value="0.6"/>
	$\tau_{c1}$ <input type="text" value="1.829"/>

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\epsilon_s$   ‰

Verifica  N° iterazioni: 0

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ X

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N Ed   kN  
 M xEd   kNm  
 M yEd

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C25/30
$\epsilon_{su}$ <input type="text" value="67.5"/> ‰	$\epsilon_{c2}$ <input type="text" value="2"/> ‰
$f_{yd}$ <input type="text" value="391.3"/> N/mm²	$\epsilon_{cu}$ <input type="text" value="3.5"/> ‰
$E_s$ <input type="text" value="200.000"/> N/mm²	$f_{cd}$ <input type="text" value="14.17"/>
$E_s/E_c$ <input type="text" value="15"/>	$f_{cc}/f_{cd}$ <input type="text" value="0.8"/> ?
$\epsilon_{syd}$ <input type="text" value="1.957"/> ‰	$\sigma_{c,adm}$ <input type="text" value="9.75"/>
$\sigma_{s,adm}$ <input type="text" value="255"/> N/mm²	$\tau_{co}$ <input type="text" value="0.6"/>
	$\tau_{c1}$ <input type="text" value="1.829"/>

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\epsilon_s$   ‰

Verifica  N° iterazioni: 0

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

## 2.4 Sezione tipo Piazzola – Parametri di resistenza minimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo Piazzola	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	220
	$\varphi'$	[°]	25 – 30	25
	E	[MPa]	300	300
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo Piazzola.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una condizione di copertura pari a 80 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

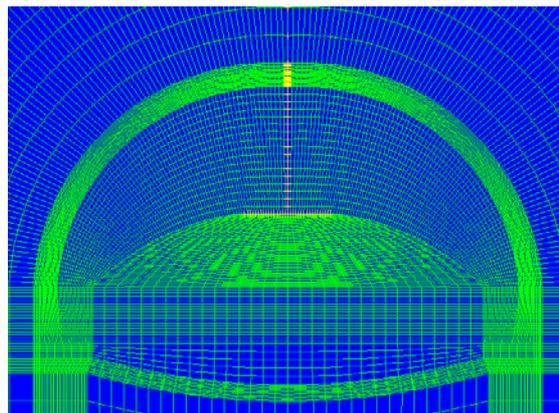
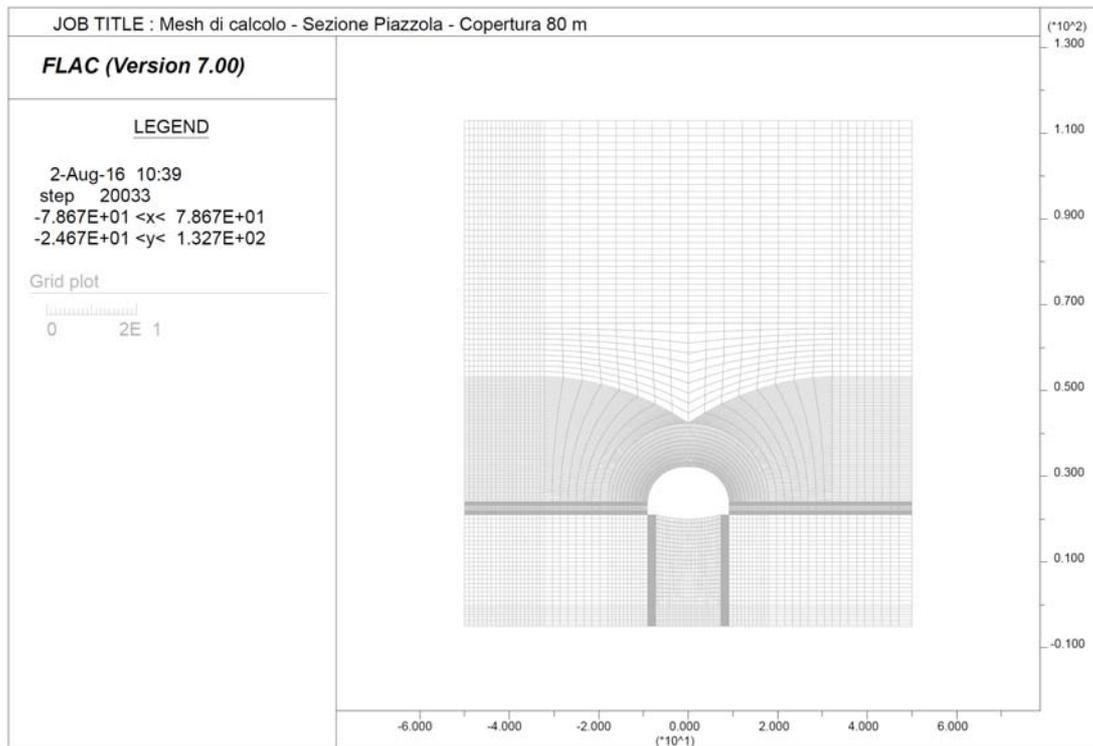
Il prerinvestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

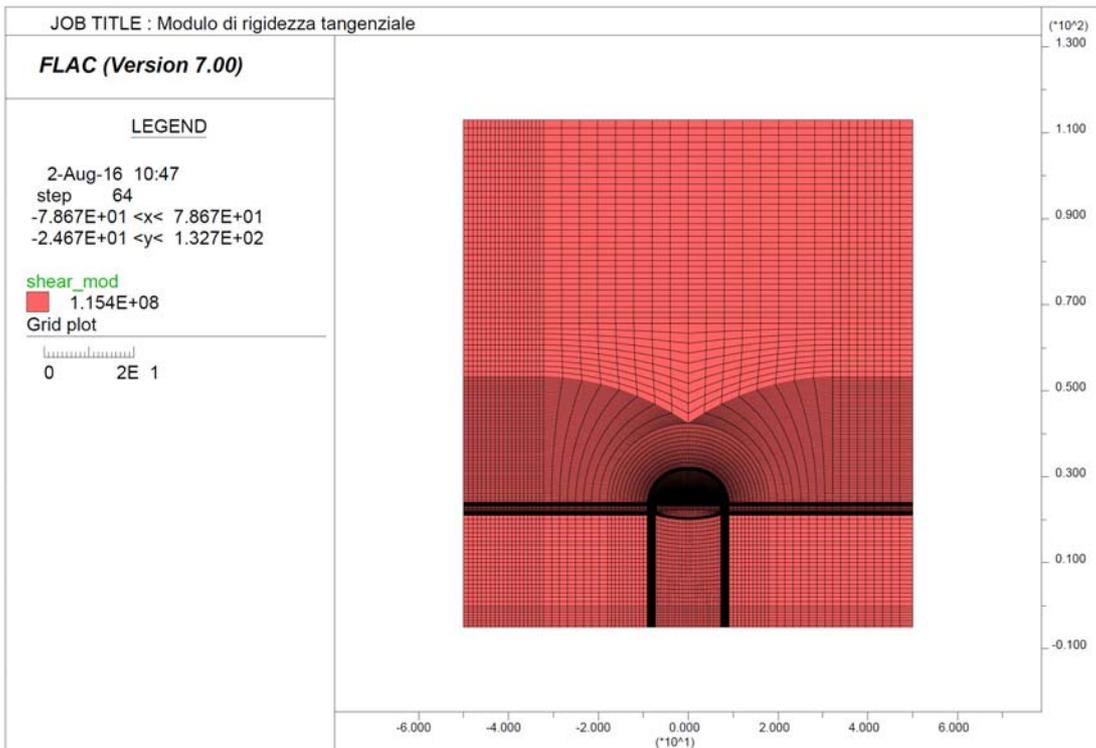
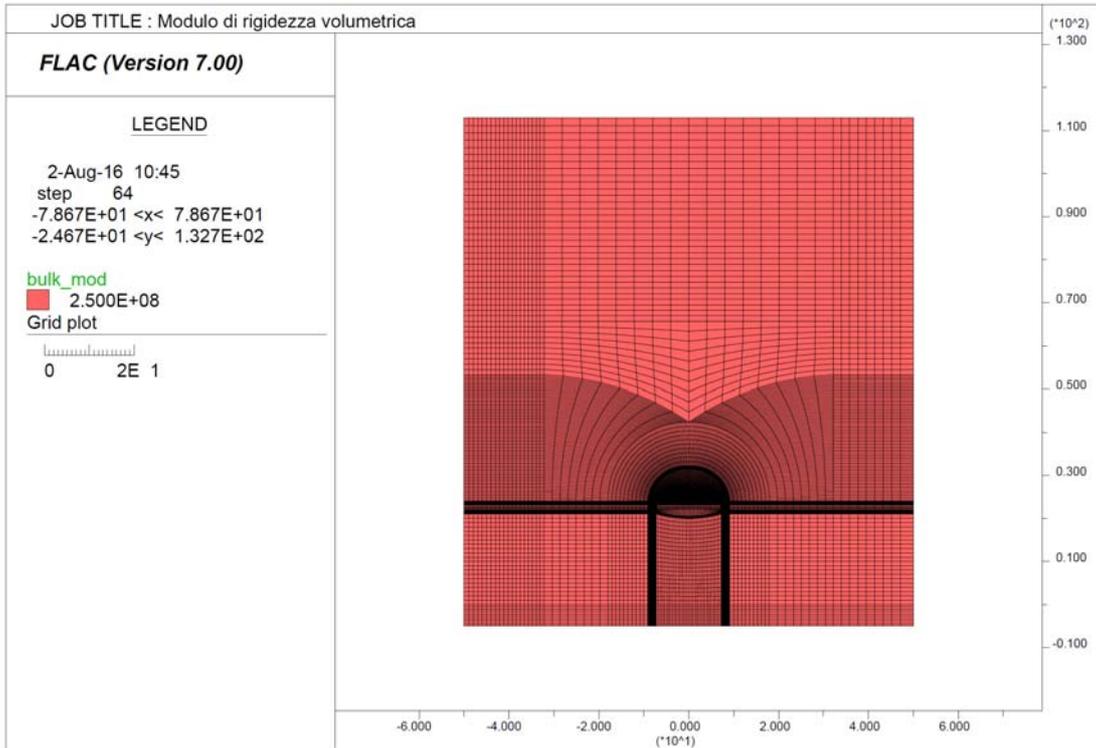
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

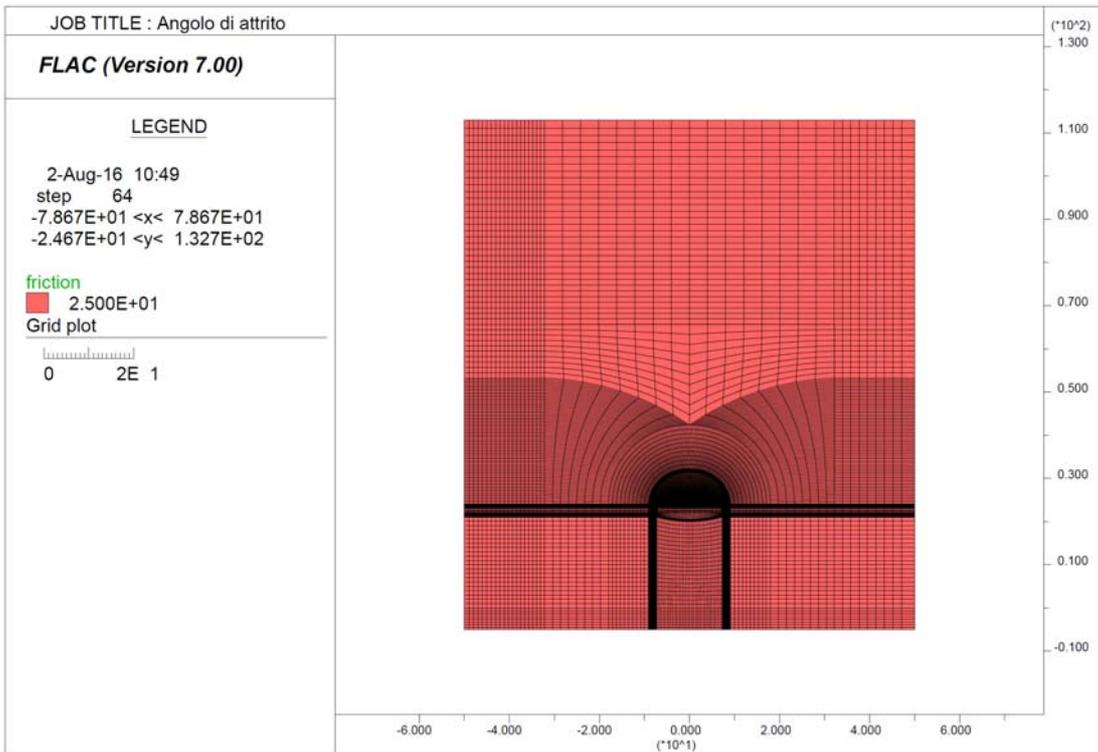
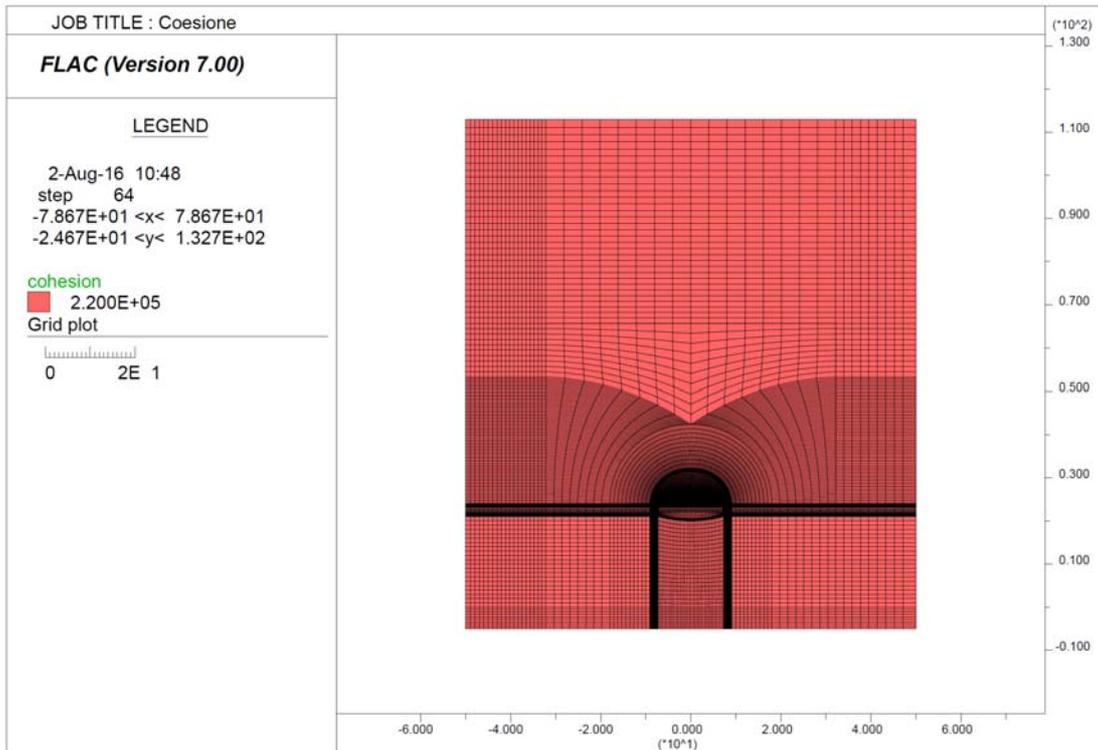
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

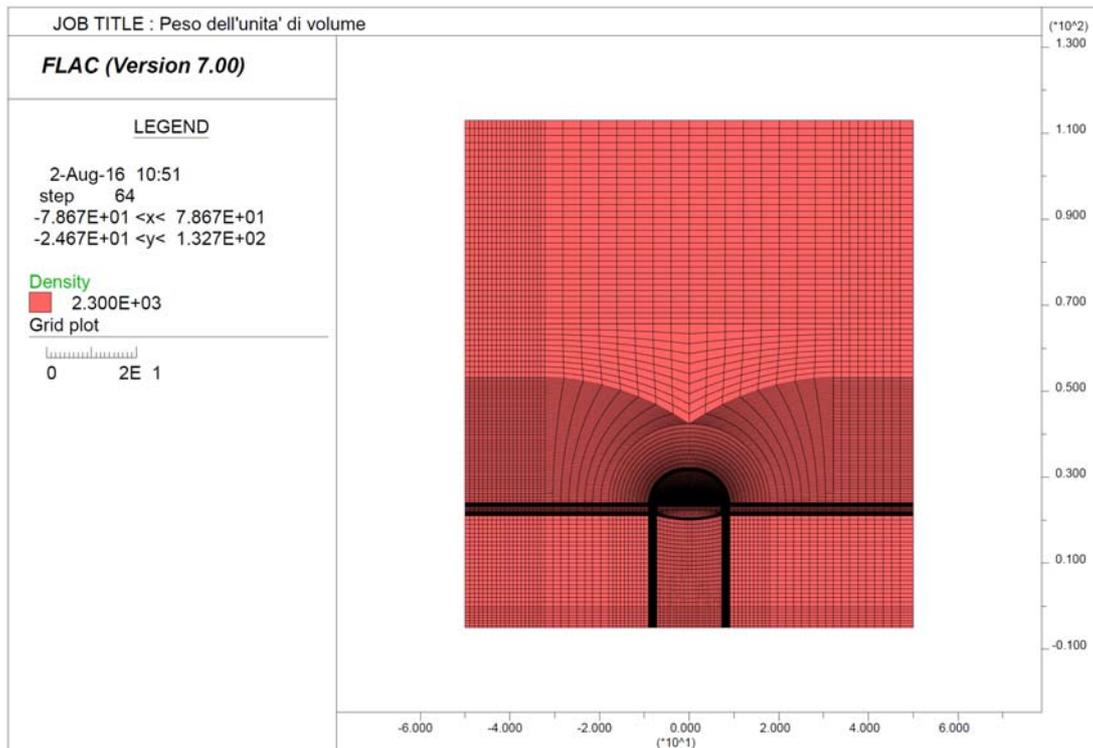
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo Piazzola - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	66,0%	3,73	-
Step 3	Scavo	1,1	70,0%	0,73*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1,1	70,0%	0,73*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	9,13	89,1%	2,1*	1,37
Step 6	Avanzamento 2 D ( E SB = 31 Gpa)	36,52	95,9%	2,93*	2,2
Step 7	Getto arco rovescio e muretta a 2D e avanzamento fino a deformazioni esaurite	-	100,0%	-	2,2
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	2,2
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	2,2

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

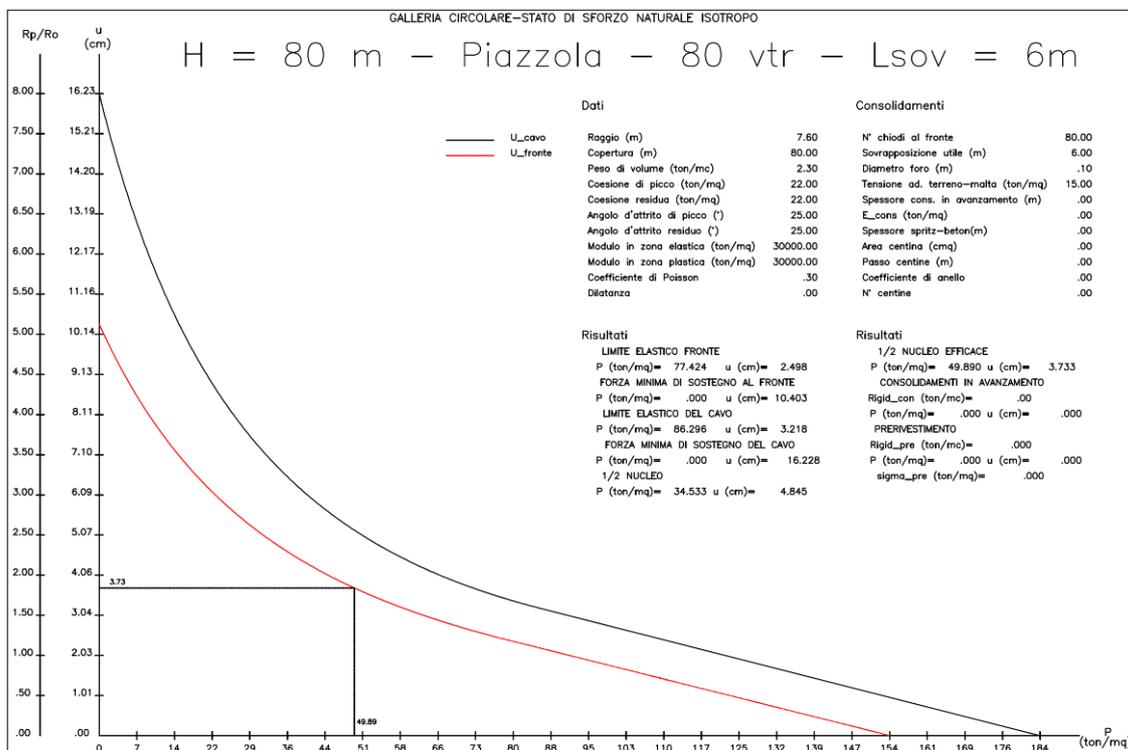
### 2.4.1 Fasi di calcolo

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il priverivestimento e per il rivestimento definitivo.

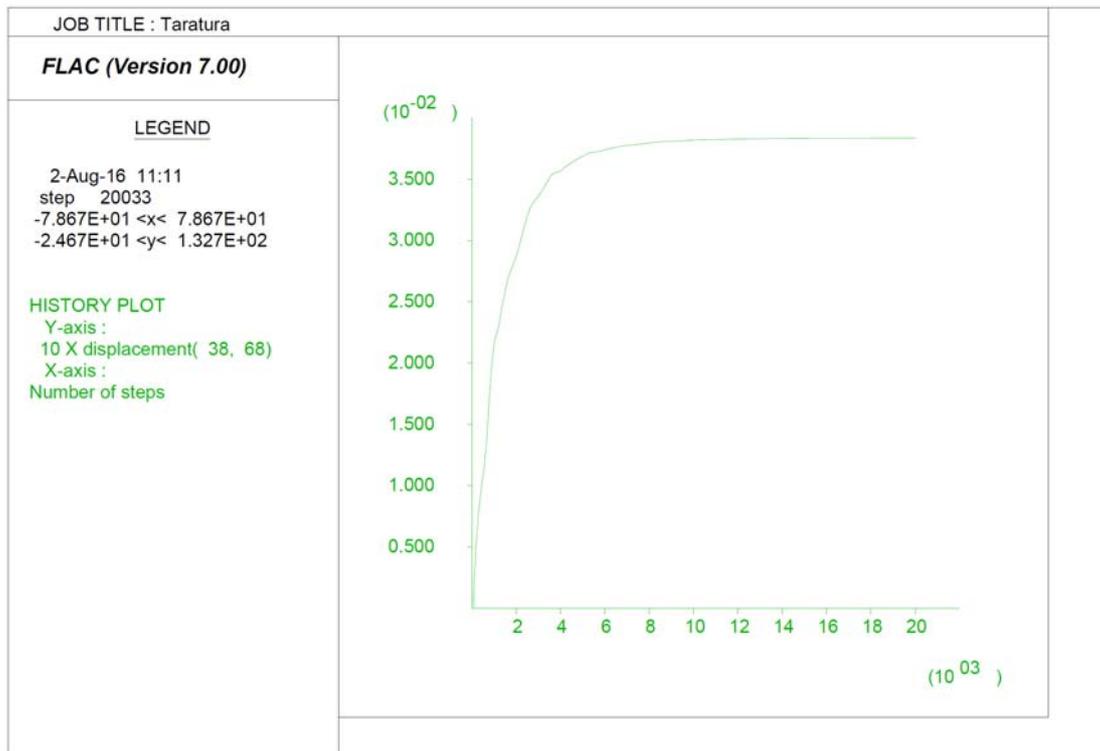
Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

**Fase 1** In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

**Fase 2** Questa fase, generalmente indicata come fase di taratura del modello, consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo. Il contributo statico fornito dalla porzione di ammasso oltre il fronte non ancora scavato viene simulato rilasciando il 66% delle forze di scavo. Tale valore è stato tarato sulla base delle indicazioni fornite dalle curve caratteristiche che, per il caso in analisi, indica una preconvergenza massima di circa 3.73 cm così come evidente dalla curva caratteristica riportata sotto.



L'output del programma di calcolo FLAC riporta lo spostamento del cavo in corrispondenza di questo step di calcolo sul piedritto sx del modello.



Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.10 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.700)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 220 / 100) con spritz beton (25 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.700)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a ½ D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton (E = 10 GPa) (fattore di rilascio = 0.891)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino a 2 D (fattore di rilascio = 0.959).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1.00)

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

### 2.4.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti

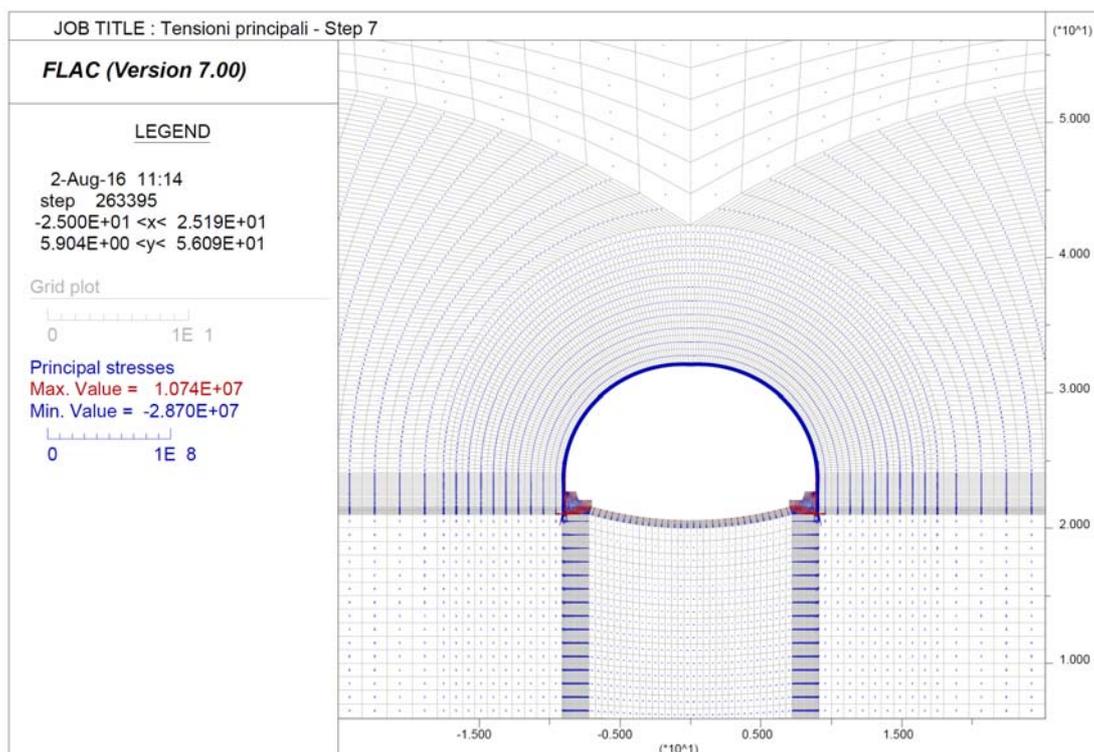
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

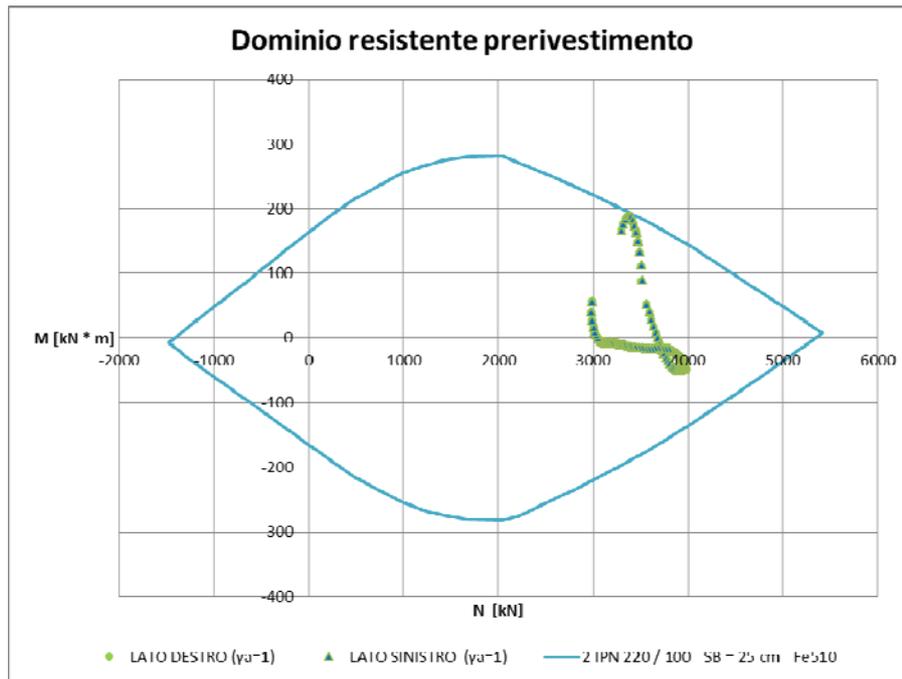
#### 2.4.1.1.1 Rivestimento di prima fase

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 220 / 100 – SB = 25 cm).



Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

**Verifica C.A. S.L.U. - File:**

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	25

N°	As [cm²]	d [cm]
1	23,912	1
2	23,912	23

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Solecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n   
 N<sub>Ed</sub>  1683 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -42 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN  yN

Tipo rottura  
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Tipo flessione  
 Retta  Deviate

N° rett.

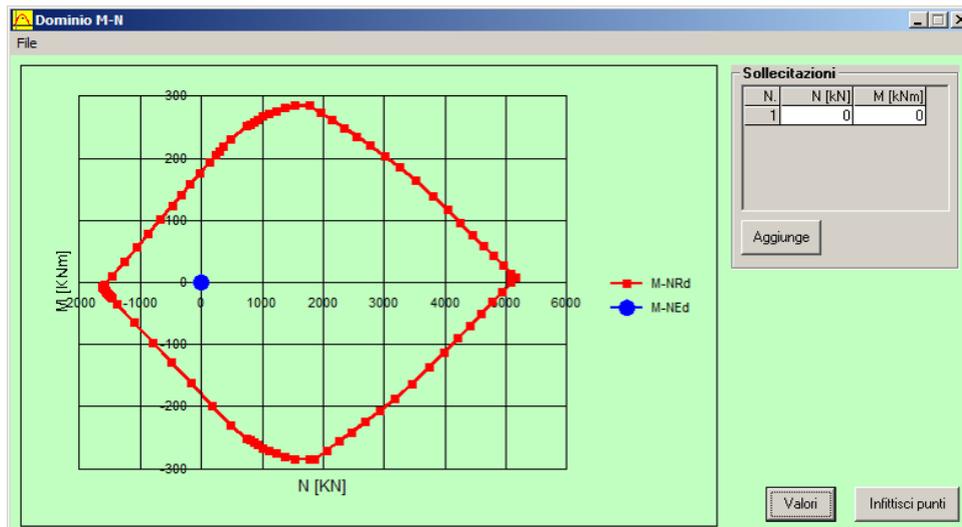
Calcola MRd Dominio M-N  
 L<sub>0</sub>  cm Col. modello

Precompresso

**Materiali**

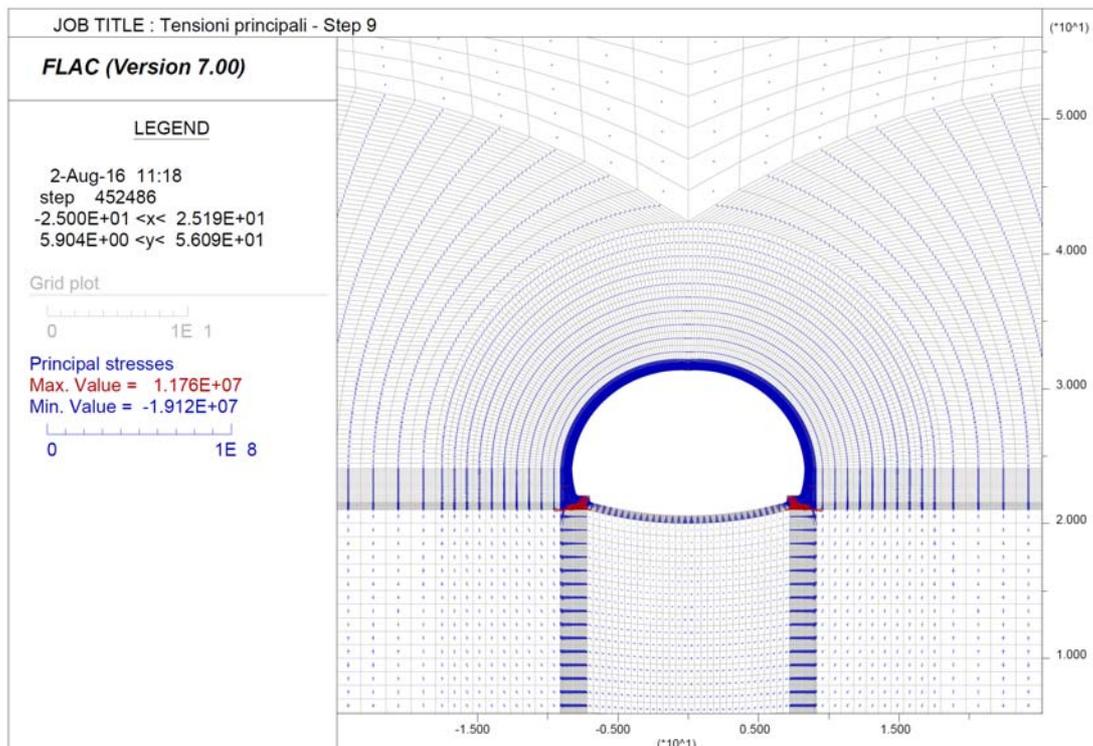
Fe510	C25/30
$\epsilon_{su}$ 67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 338,1 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$ 3,5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$ 14,17
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0,8
$\epsilon_{syd}$ 1,691 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 9,75
$\sigma_{s,adm}$ 240 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$ 0,6
	$\tau_{c1}$ 1,829

M<sub>xRd</sub> 178,5 kN m  
 $\sigma_c$  -14,17 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_c$  3,5 ‰  
 $\epsilon_s$  46,95 ‰  
 d 23 cm  
 x 1,596 x/d 0,06937  
 $\delta$  0,7



#### 2.4.1.1.2 Rivestimento definitivo

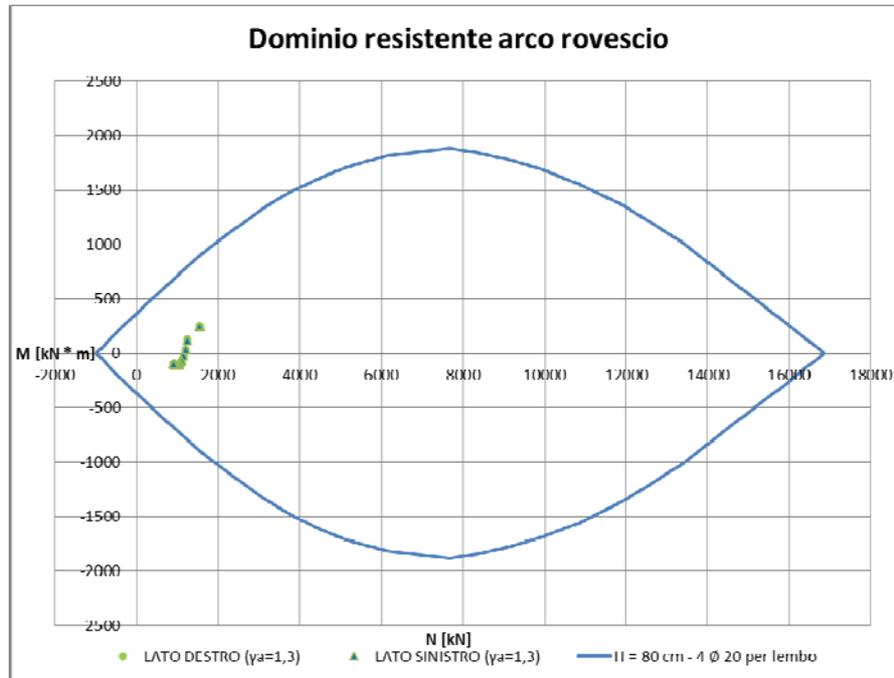
Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase). La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



## Arco rovescio - H = 80 cm

### Verifica SLU

#### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Stato limite di fessurazione

#### **Verifica nei confronti delle Punta tensionali**

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

Elemento	N [kN]	M [kN * m]
Muretta sx	1193	190
Muretta dx	1197	192
Mezzeria Arco rovescio	698	-73

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	80

N°	As [cm²]	d [cm]
1	12,57	5,5
2	12,57	74,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 1193 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 190 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391,3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$	3,5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm²	$f_{cd}$	19,83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0,8
$\epsilon_{syd}$	1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13,5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm²	$\tau_{co}$	0,8
		$\tau_{c1}$	2,257

$\sigma_c$  -3,047 N/mm²  
 $\sigma_s$  -0,1797 N/mm²

$\epsilon_s$  0 ‰  
d 74,5 cm  
x 74,79 x/d 1,004  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 2

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	80

N°	As [cm²]	d [cm]
1	12,57	5,5
2	12,57	74,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 1197 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 192 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391,3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$	3,5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm²	$f_{cd}$	19,83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0,8
$\epsilon_{syd}$	1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13,5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm²	$\tau_{co}$	0,8
		$\tau_{c1}$	2,257

$\sigma_c$  -3,07 N/mm²  
 $\sigma_s$  0,01311 N/mm²

$\epsilon_s$  0 ‰  
d 74,5 cm  
x 74,48 x/d 0,9997  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 3

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: [ ] [ ] [ ] [ ]

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	80

N°	As [cm²]	d [cm]
1	12,57	5,5
2	12,57	74,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  698 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -73 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm<sup>2</sup>  $\epsilon_{cu}$   ‰  
 $E_s$   N/mm<sup>2</sup>  $f_{cd}$   ‰  
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ?  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$   ‰  
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm<sup>2</sup>  $\tau_{co}$   ‰  
 $\tau_{c1}$   ‰

$\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_s$   ‰

Verifica  
 N° iterazioni:

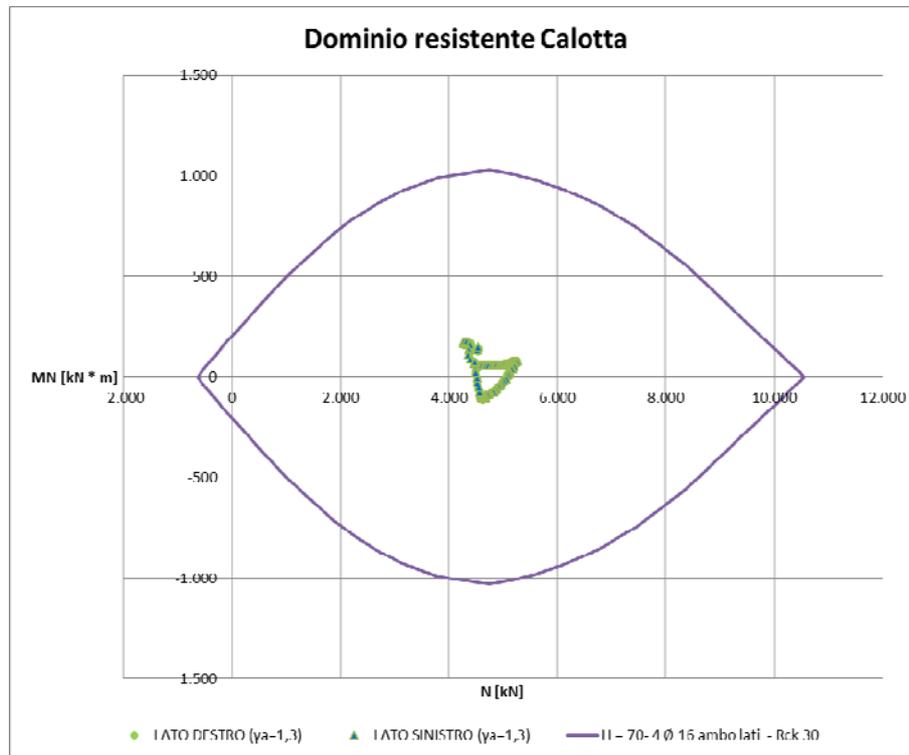
Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

## Calotta – H = 70 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

#### **Verifica nei confronti delle Punta tensionali**

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

Elemento	N [kN]	M [kN * m]
Rene sx	4006	59
Rene dx	4043	62
Chiave	3453	55

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_70\_rck30\_4fi16

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	70	1	8,04	5,5
			2	8,04	64,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>   kN  
 M<sub>xEd</sub>   kNm  
 M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Materiali  
   
 $\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm²  $\epsilon_{cu}$    
 $E_s$   N/mm²  $f_{cd}$    
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ?  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$    
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm²  $\tau_{co}$    
 $\tau_{c1}$

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\epsilon_s$   ‰

Verifica  N° iterazioni:  
 Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_70\_rck30\_4fi16

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	70	1	8,04	5,5
			2	8,04	64,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>   kN  
 M<sub>xEd</sub>   kNm  
 M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Materiali  
   
 $\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm²  $\epsilon_{cu}$    
 $E_s$   N/mm²  $f_{cd}$    
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ?  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$    
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm²  $\tau_{co}$    
 $\tau_{c1}$

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\epsilon_s$   ‰

Verifica  N° iterazioni:  
 Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_70\_rck30\_4fi16

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	70

N°	As [cm²]	d [cm]
1	8,04	5,5
2	8,04	64,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N Ed  3453 kN  
 M xEd  55 kNm  
 M yEd  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN  yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C  C25/30

$\epsilon_{su}$	<input type="text" value="67.5"/> ‰	$\epsilon_{c2}$	<input type="text" value="2"/> ‰
$f_{yd}$	<input type="text" value="391.3"/> N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	<input type="text" value="3.5"/> ‰
$E_s$	<input type="text" value="200.000"/> N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	<input type="text" value="14.17"/> ‰
$E_s/E_c$	<input type="text" value="15"/>	$f_{cc}/f_{cd}$	<input type="text" value="0.8"/> ?
$\epsilon_{syd}$	<input type="text" value="1.957"/> ‰	$\sigma_{c,adm}$	<input type="text" value="9.75"/>
$\sigma_{s,adm}$	<input type="text" value="255"/> N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	<input type="text" value="0.6"/>
		$\tau_{c1}$	<input type="text" value="1.029"/>

$\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>

Verifica  N° iterazioni:

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

## 2.5 Sezione tipo Piazzola B0 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo Piazzola B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	250
	$\varphi'$	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	300	300
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo Piazzola B0 con parametri di resistenza pari ai massimi tra quelli individuati dal range di variabilità.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una condizione di copertura pari a 80 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

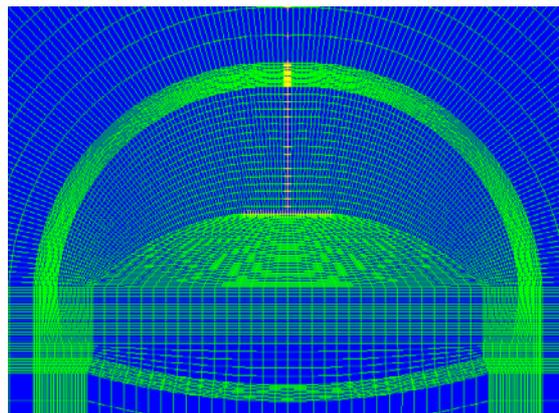
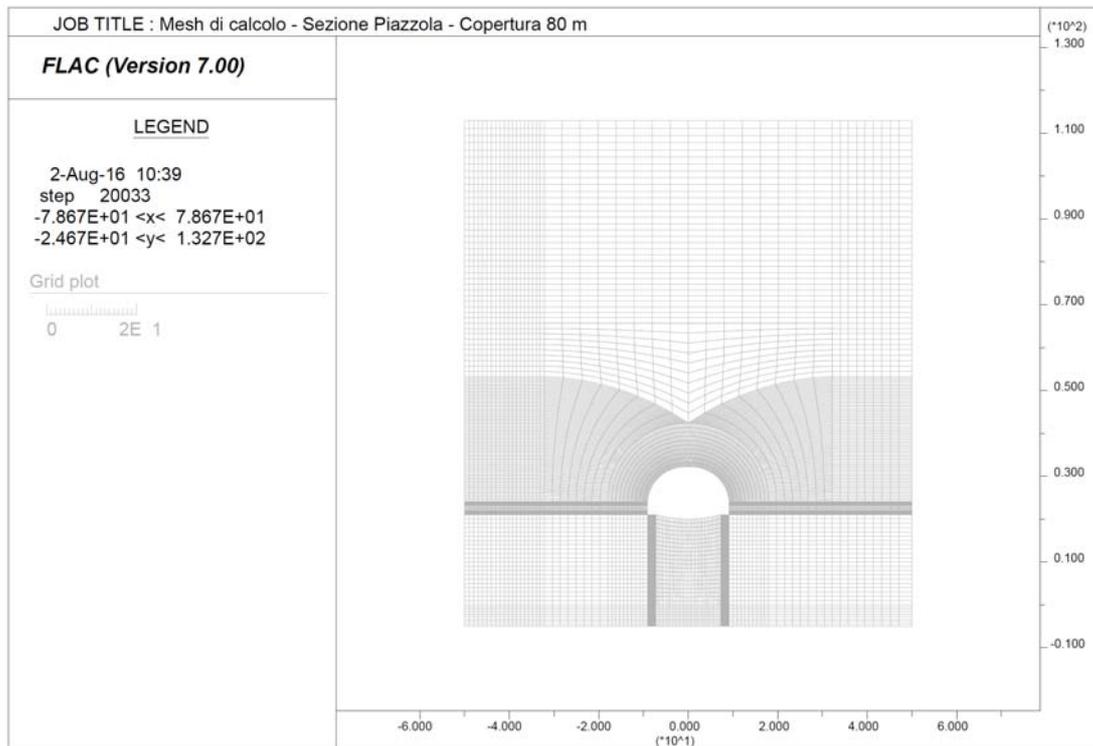
Il prerinvestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

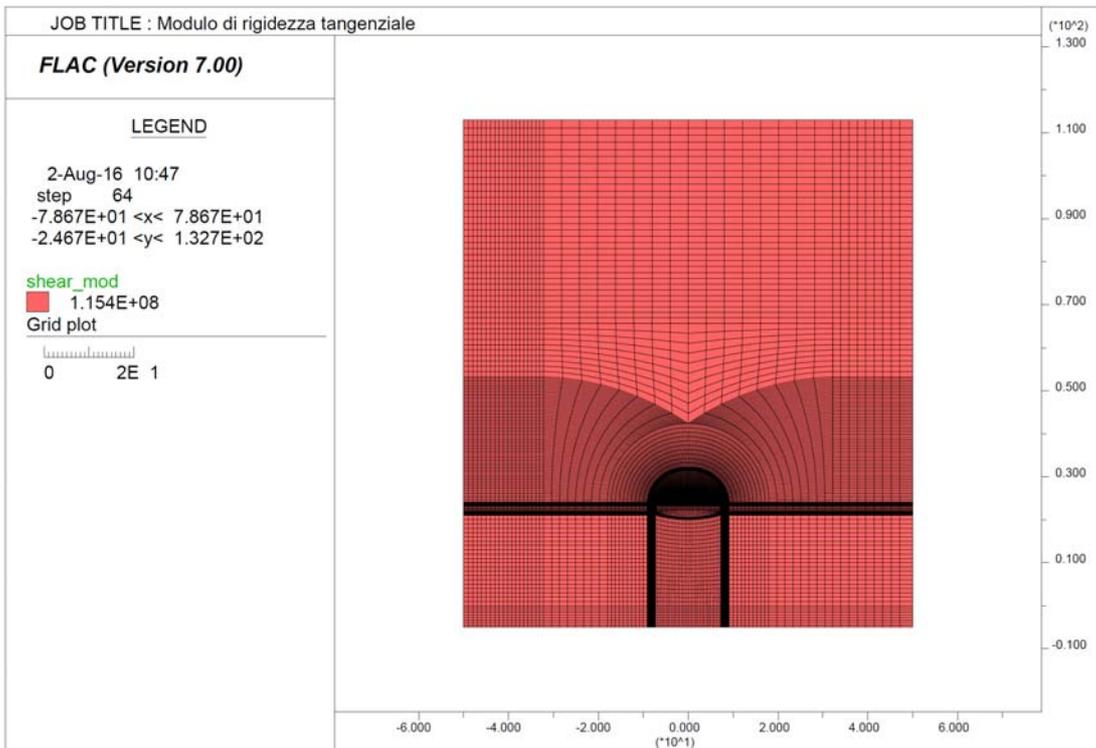
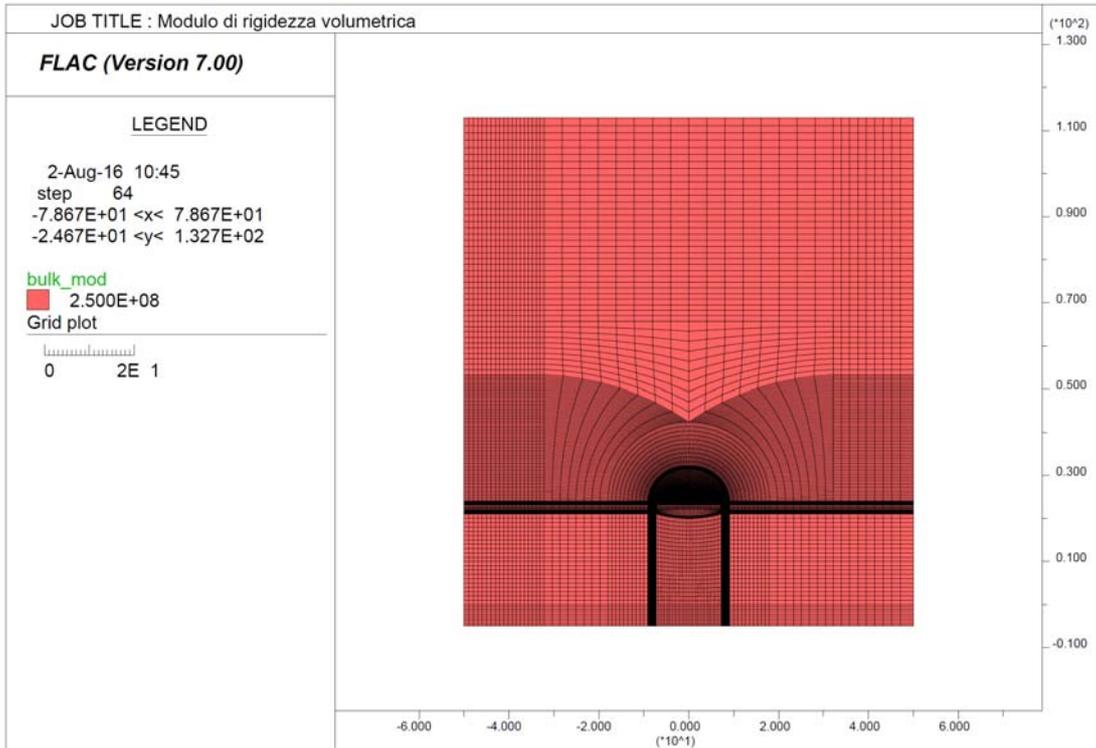
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

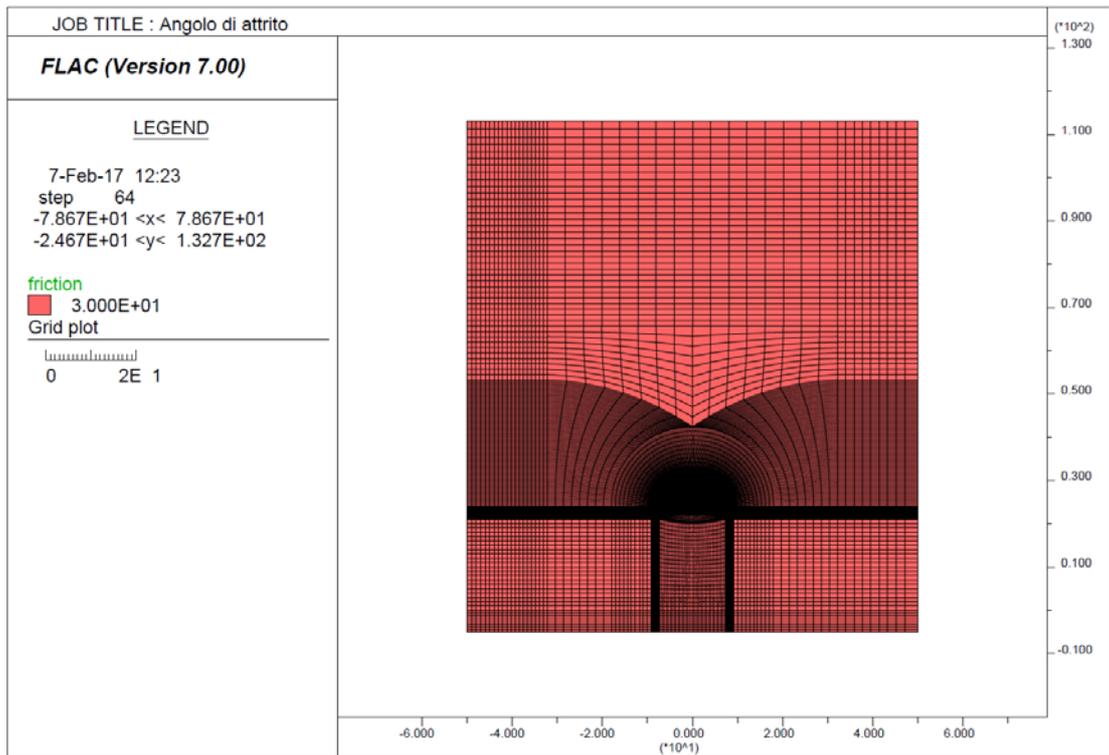
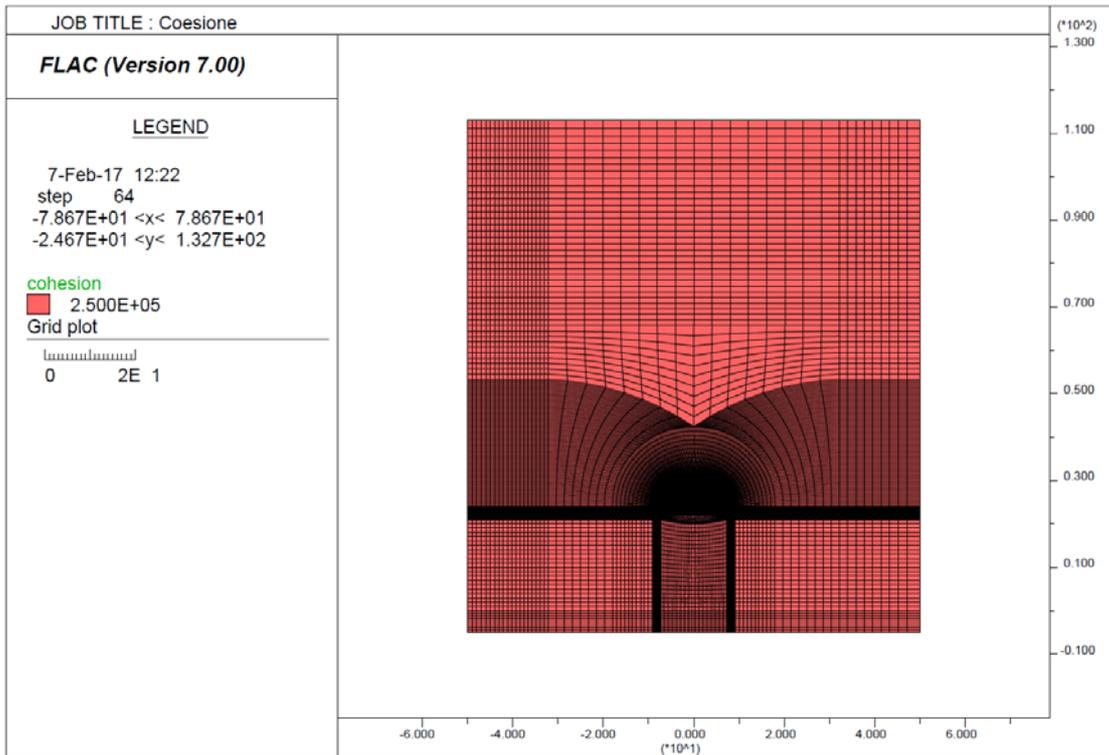
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

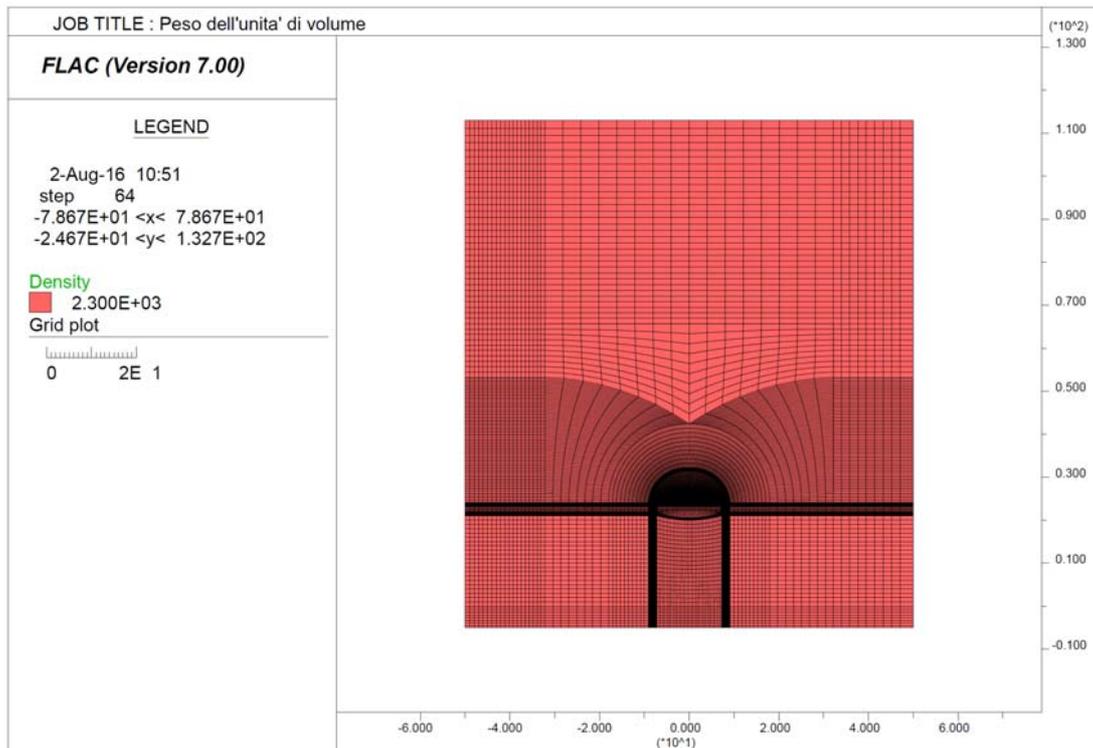
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo Piazzola B0 - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	77,0%	3,78	-
Step 3	Scavo	1,1	79,7%	0,43*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1,1	79,7%	0,43*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	9,13	92,7%	1,03*	0,6
Step 6	Avanzamento fino ad esaurimento deformazioni ( E SB = 31 Gpa)	-	100,0%	1,63*	1,2
Step 7	Getto arco rovescio e muretta	-	100,0%	-	1,2
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	1,2
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	1,2

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

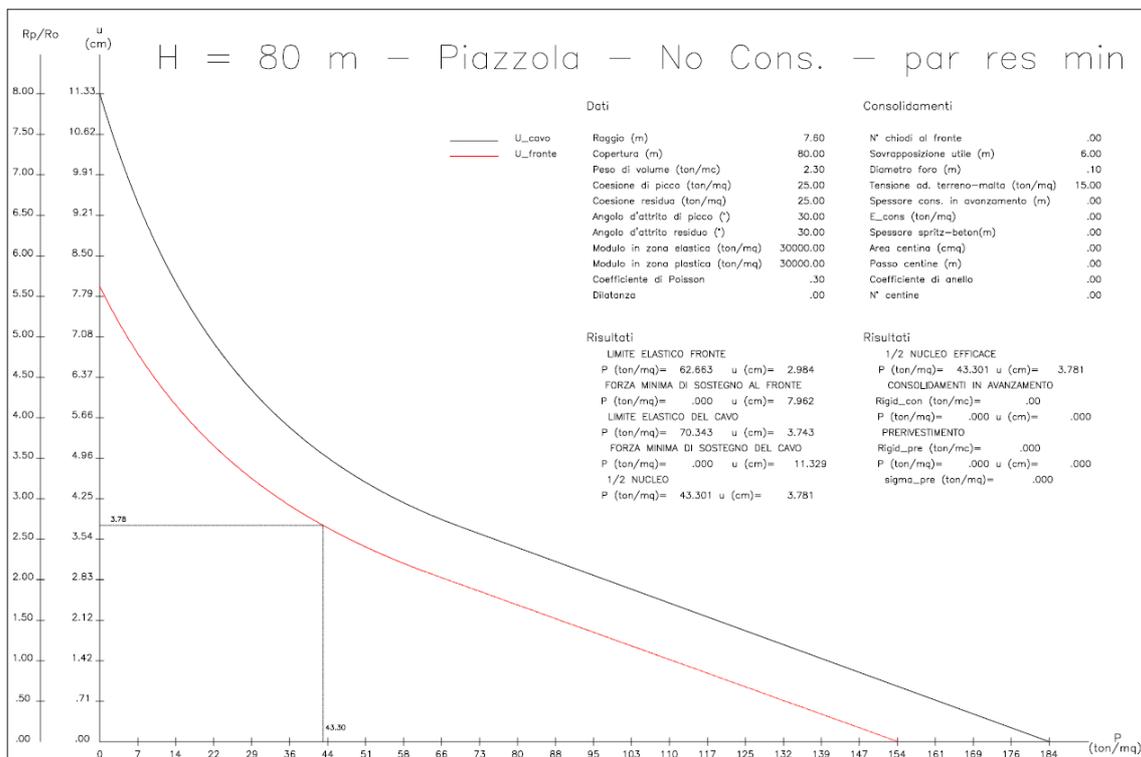
### 2.5.1 Fasi di calcolo

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il priverivestimento e per il rivestimento definitivo.

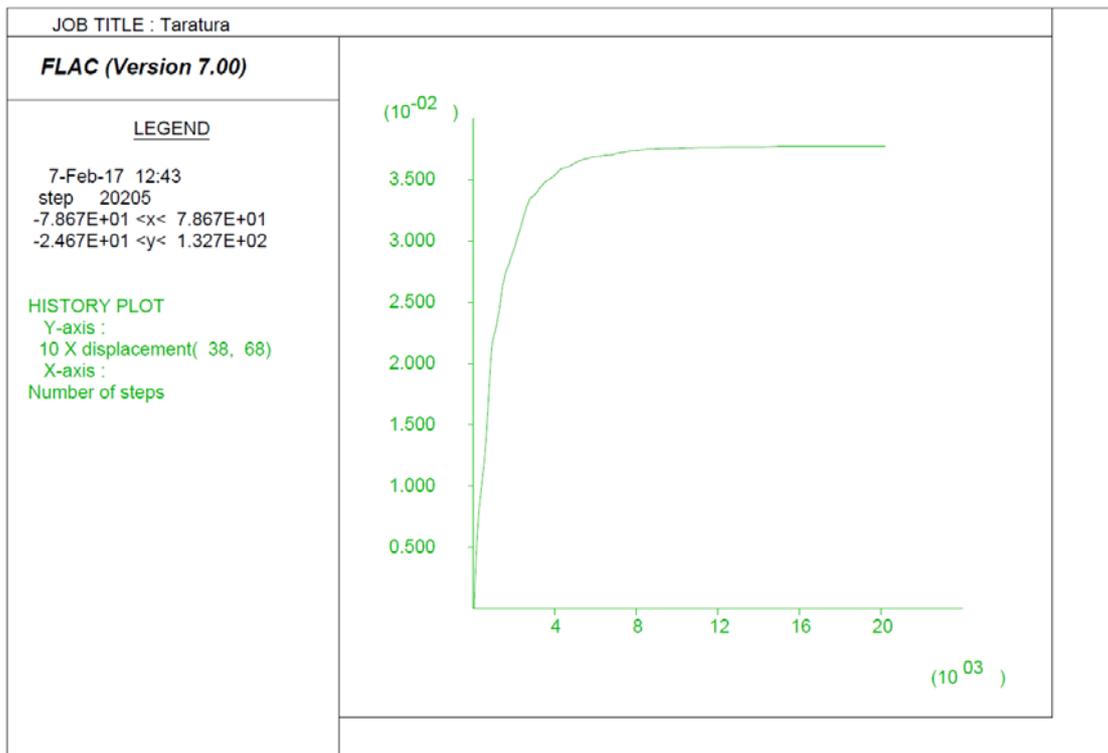
Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

**Fase 1** In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

**Fase 2** Questa fase, generalmente indicata come fase di taratura del modello, consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo. Il contributo statico fornito dalla porzione di ammasso oltre il fronte non ancora scavato viene simulato rilasciando il 77% delle forze di scavo. Tale valore è stato tarato sulla base delle indicazioni fornite dalle curve caratteristiche che, per il caso in analisi, indica una preconvergenza massima di circa 3.78 cm così come evidente dalla curva caratteristica riportata sotto.



L'output del programma di calcolo FLAC riporta lo spostamento del cavo in corrispondenza di questo step di calcolo sul piedritto sx del modello.



Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.10 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.797)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 220 / 100) con spritz beton (25 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.797)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a ½ D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton (E = 10 GPa) (fattore di rilascio = 0.927)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

### 2.5.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti

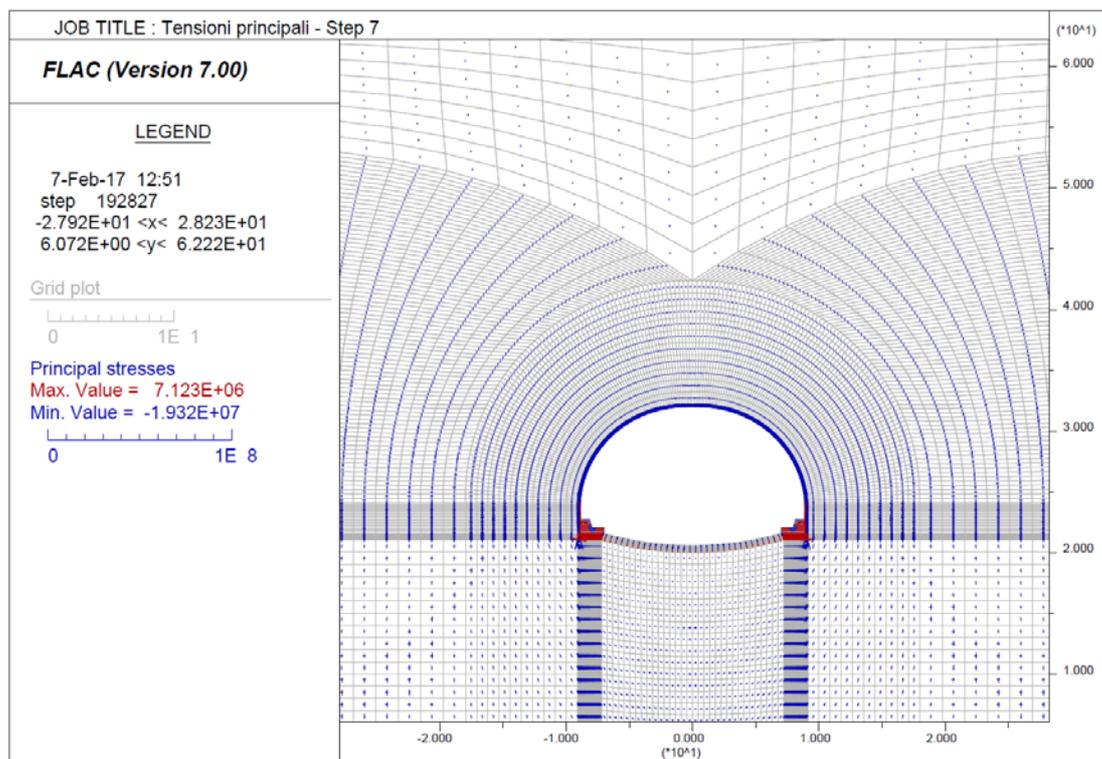
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

#### 2.5.1.1.1 Rivestimento di prima fase

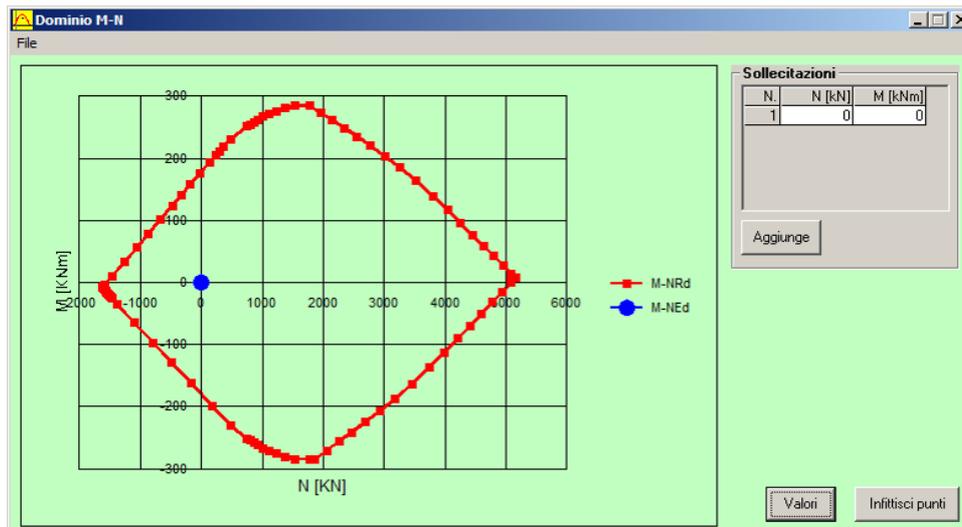
Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



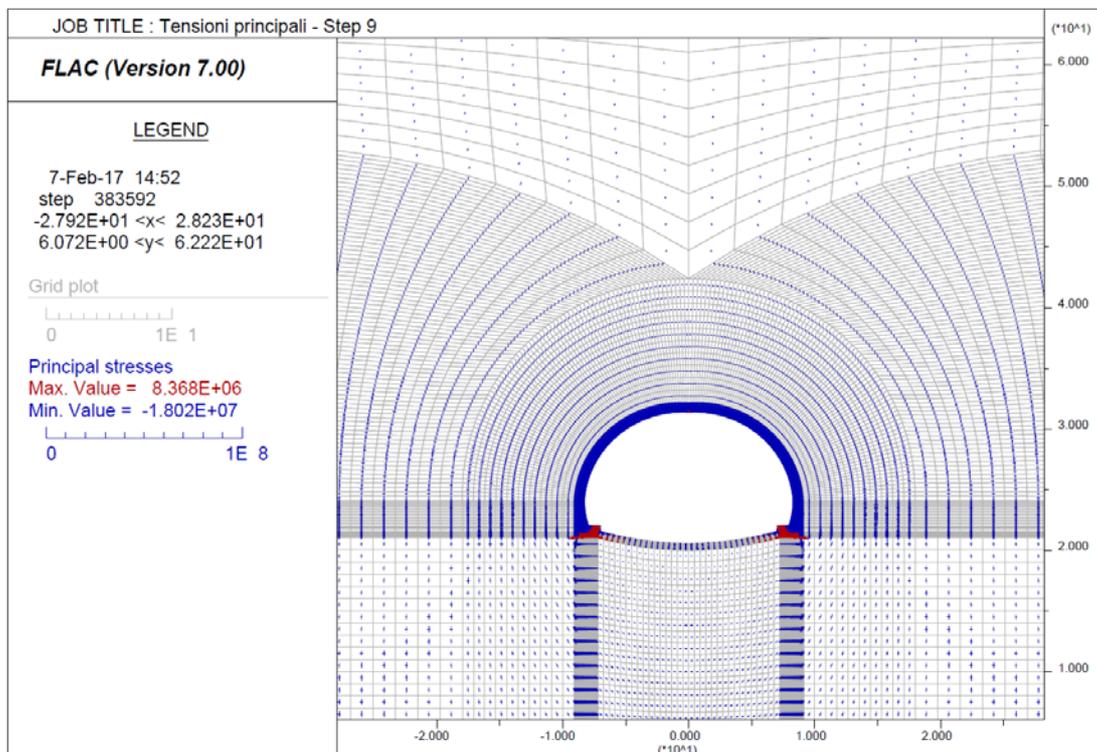
Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 220 / 100 – SB = 25 cm).





### 2.5.1.1.2 Rivestimento definitivo

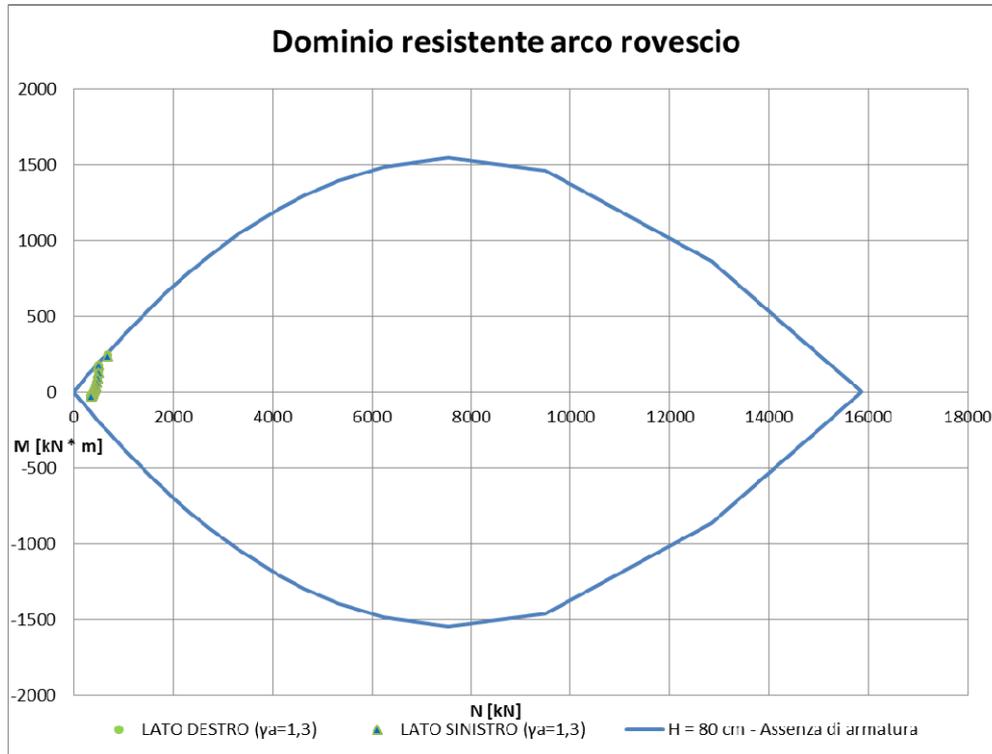
Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase). La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



## Arco rovescio - H = 80 cm

### Verifica SLU

#### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Stato limite di fessurazione

#### **Verifica nei confronti delle Punta tensionali**

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	383	100
<i>Muretta dx</i>	381	102
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	265	-21

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	80	1	0	5
			2	0	75

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 383 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 100 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C35/45
$\epsilon_{su}$ 67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391.3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3.5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 19.83
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0.8 ?
$\epsilon_{syd}$ 1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 13.5
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²	$\tau_{co}$ 0.8
	$\tau_{c1}$ 2.257

$\sigma_c$  -1.838 N/mm²  
 $\sigma_s$  22.05 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.1103 ‰  
 d 75 cm  
 x 41.67 w/d 0.5556  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 5

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	80	1	0	5
			2	0	75

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 381 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 102 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C35/45
$\epsilon_{su}$ 67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391.3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3.5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 19.83
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0.8 ?
$\epsilon_{syd}$ 1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 13.5
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²	$\tau_{co}$ 0.8
	$\tau_{c1}$ 2.257

$\sigma_c$  -1.92 N/mm²  
 $\sigma_s$  25.63 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.1282 ‰  
 d 75 cm  
 x 39.69 w/d 0.5291  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 5

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	80	1	0	5
			2	0	75

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  265 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -21 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	19.83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8 ?
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13.5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0.8
		$\tau_{c1}$	2.257

$\sigma_c$  -0.5281 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_s$  -0.01192 ‰

Verifica  
 N° iterazioni:

Precompresso

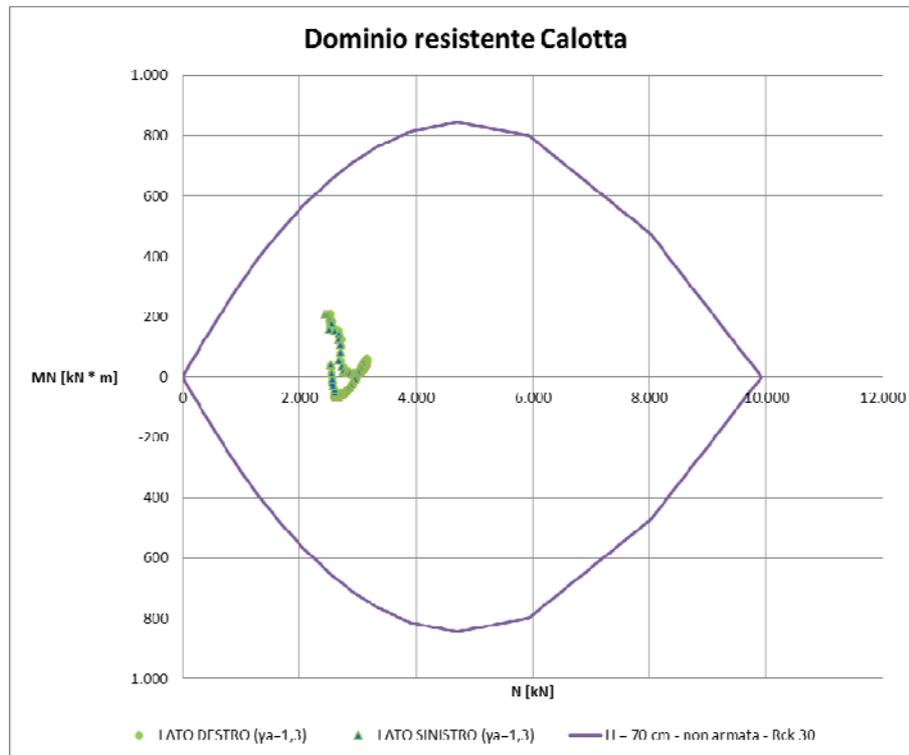
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione della muretta destra dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 800 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 745 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 745 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 47 [mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{t,1}$ = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{t,1}$ = 1 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,1}$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{t,2}$ = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{t,2}$ = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,2}$ = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	$f_{ck}$ = 35 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	$f_{ctm}$ = 3,2 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	$E_{cm}$ = 34077 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$ = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	$E_s$ = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	$\sigma_s$ = 25,63 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 36,69 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	$\alpha_e$ = 5,87 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	$A_s$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	$A_{c,eff,1}$ = 137500 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,2}$ = 254437 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,3}$ = 400000 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,min}$ = 137500 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	$r_{p,eff}$ = 2,285E-05 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	$f_{ct,eff}$ = 3,2099624 [MPa]
Fattore di durata del carico	$k_t$ = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	$[e_{sm} - \epsilon_{cm}]_{min}$ = 7,689E-05 [-]
	$[e_{sm} - \epsilon_{cm}]_{calc.}$ = -0,2808943 [-]
	<b><math>[e_{sm} - \epsilon_{cm}]</math> = 0,000077 [-]</b>
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	$f_{eq}$ = 1 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	$s_{max,ref}$ = 237,5 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	$k_1$ = 0,800 [-] $k_2$ = 0,500 [-] $k_3$ = 3,400 [-] $k_4$ = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	$s_{r,max,1}$ = 7600,2928 [mm]
	$s_{r,max,2}$ = 992,303 [mm]
	<b><math>s_{r,max}</math> = 992 [mm]</b>
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	$w_{k,lim}$ = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b><math>w_k</math> = 0,08 [mm]</b>

## Calotta – H = 70 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

#### **Verifica nei confronti delle Punta tensionali**

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

Elemento	N [kN]	M [kN * m]
Rene sx	2412	42
Rene dx	2433	45
Chiave	1952	30

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_70\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	70

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  2412 kN  
 M<sub>xEd</sub>  42 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C25/30
$\epsilon_{su}$ 67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$ 3.5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$ 14.17
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0.8 ?
$\epsilon_{syd}$ 1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 9.75
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$ 0.6
	$\tau_{c1}$ 1.829

$\sigma_c$  -3.96 N/mm<sup>2</sup>

Verifica

N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_70\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	70

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  2433 kN  
 M<sub>xEd</sub>  45 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C25/30
$\epsilon_{su}$ 67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$ 3.5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$ 14.17
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0.8 ?
$\epsilon_{syd}$ 1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 9.75
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$ 0.6
	$\tau_{c1}$ 1.829

$\sigma_c$  -4.027 N/mm<sup>2</sup>

Verifica

N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_70\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	70

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Solecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  1952 kN  
 M<sub>xEd</sub>  30 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C25/30	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	14.17
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8 ?
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9.75
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0.6
		$\tau_{c1}$	1.829

$\sigma_c$  -3.156 N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ci}$  ‰

Verifica

N° iterazioni:

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

### 3. VERIFICA SEZIONE TIPO - COPERTURA 25 < H < 50 M

Le formazioni incluse nella tratta di copertura tra 25 e 50 m sono:

- Formazione di Camerino (Associazione Pelitica Arenacea)
- Formazione dello Schlier

#### 3.1 Sezione tipo B0 – Parametri di resistenza minimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	220
	$\varphi'$	[°]	25 – 30	25
	E	[MPa]	200	200
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B0.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una copertura pari a 50 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

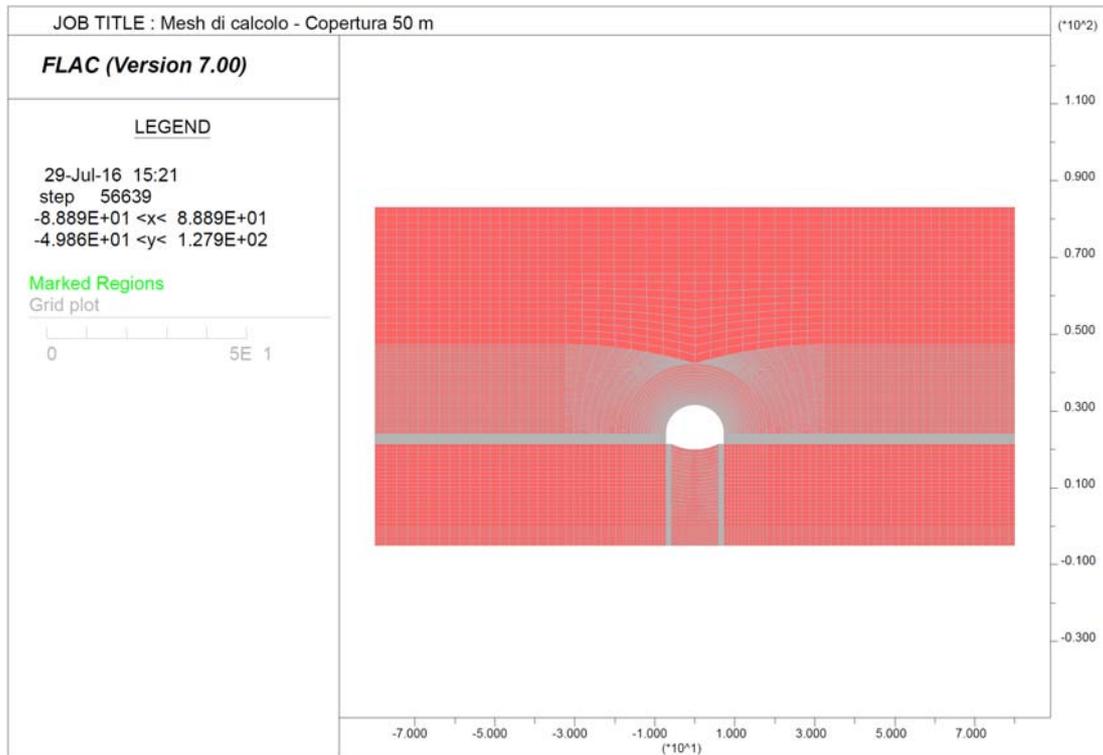
Il prerivestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

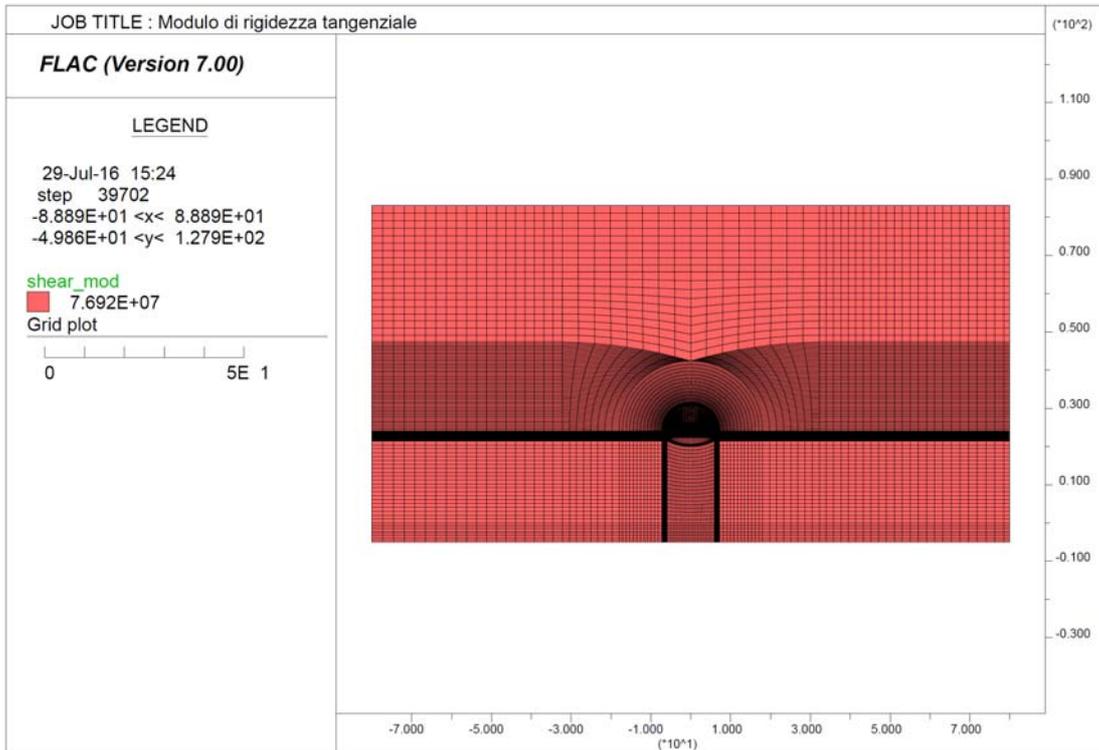
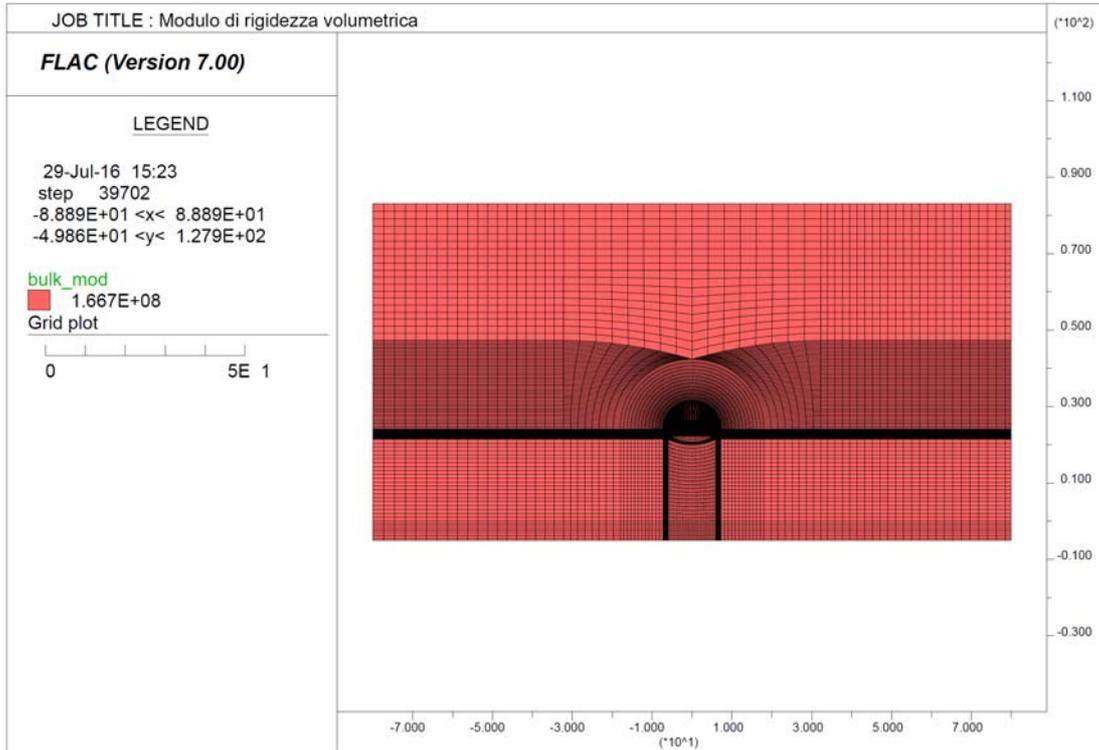
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

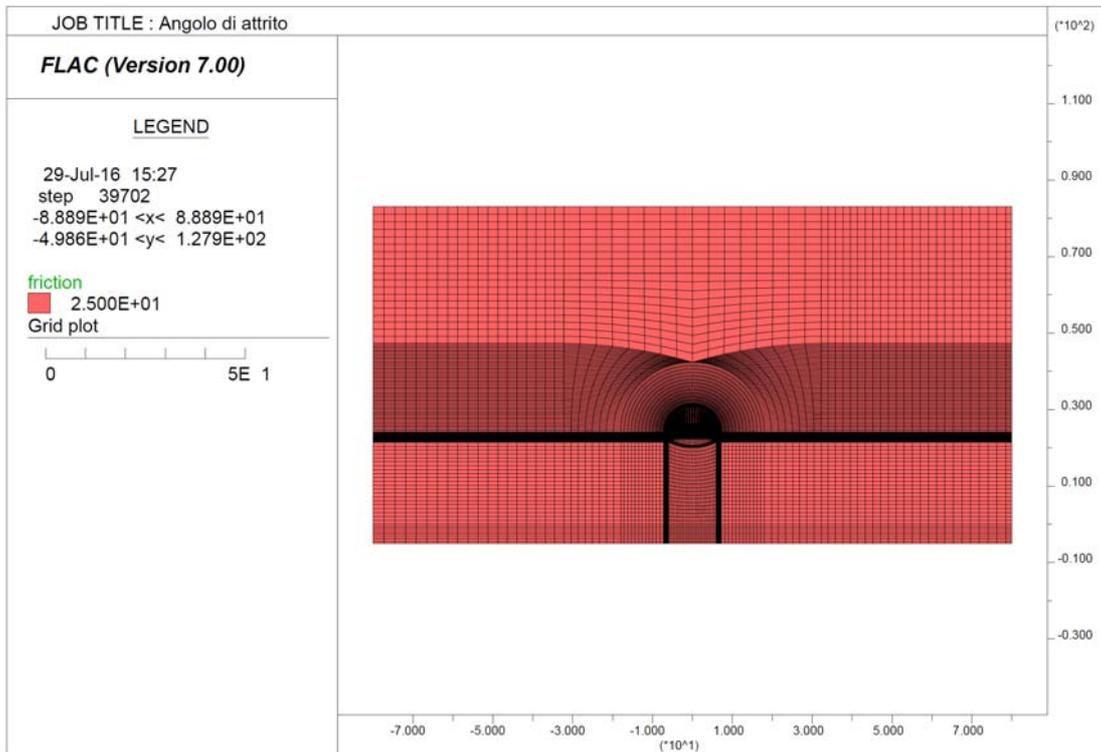
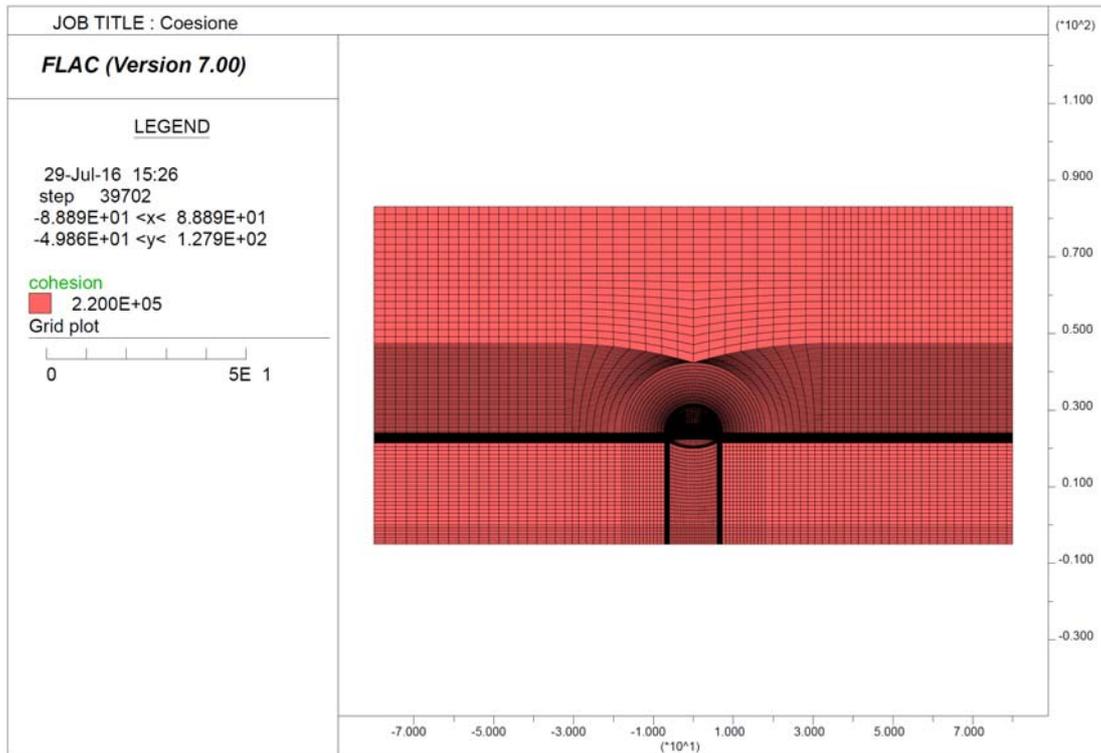
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

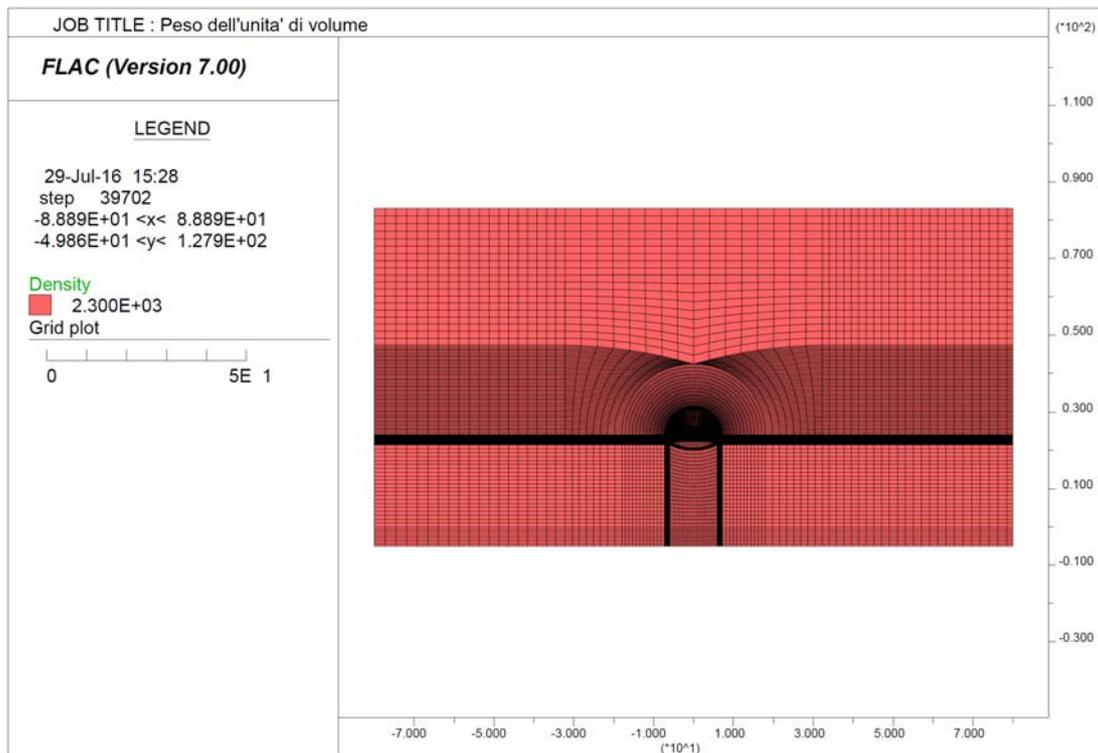
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo B0 - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	71,0%	2,67	-
Step 3	Scavo	1	75,0%	0,48*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	75,0%	0,48*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	90,7%	1,52*	1,04
Step 6	Avanzamento fino a deformazioni esaurite ( E SB = 31 Gpa)	-	100,0%	2,44*	1,96
Step 7	Getto arco rovescio e muretta	-	100,0%	-	1,96
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	1,96
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	1,96

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

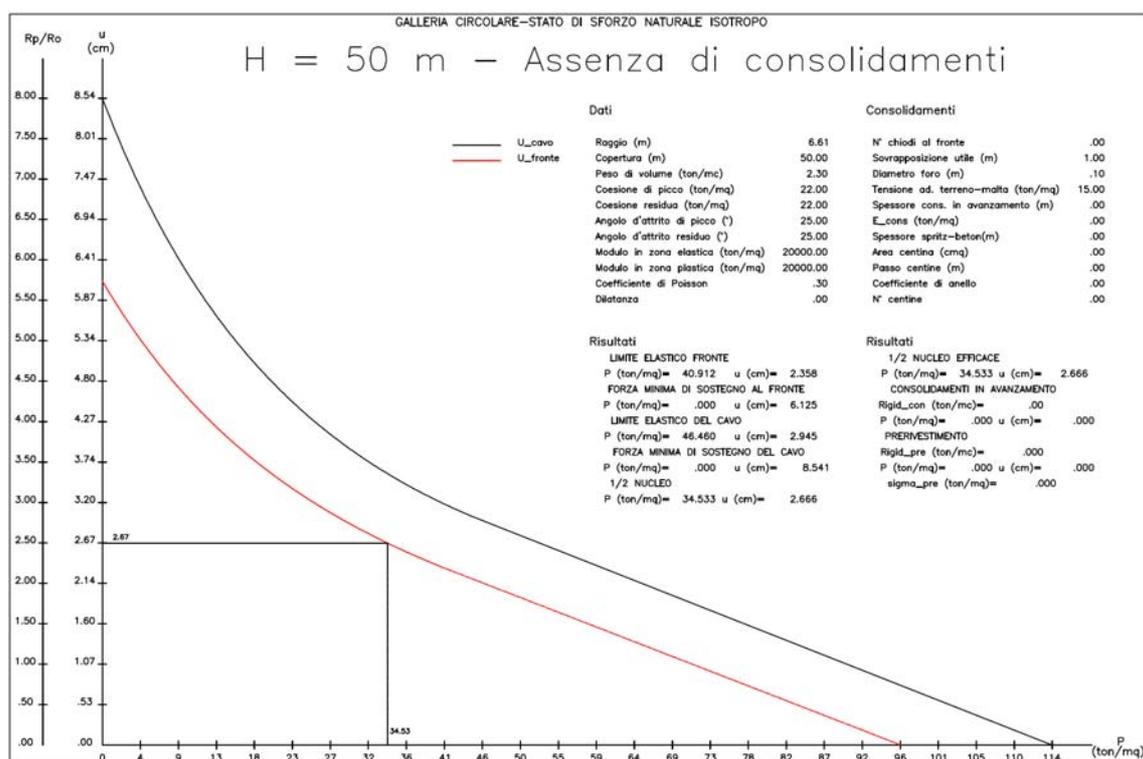
### 3.1.1 Fasi di calcolo

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il pririvestimento e per il rivestimento definitivo.

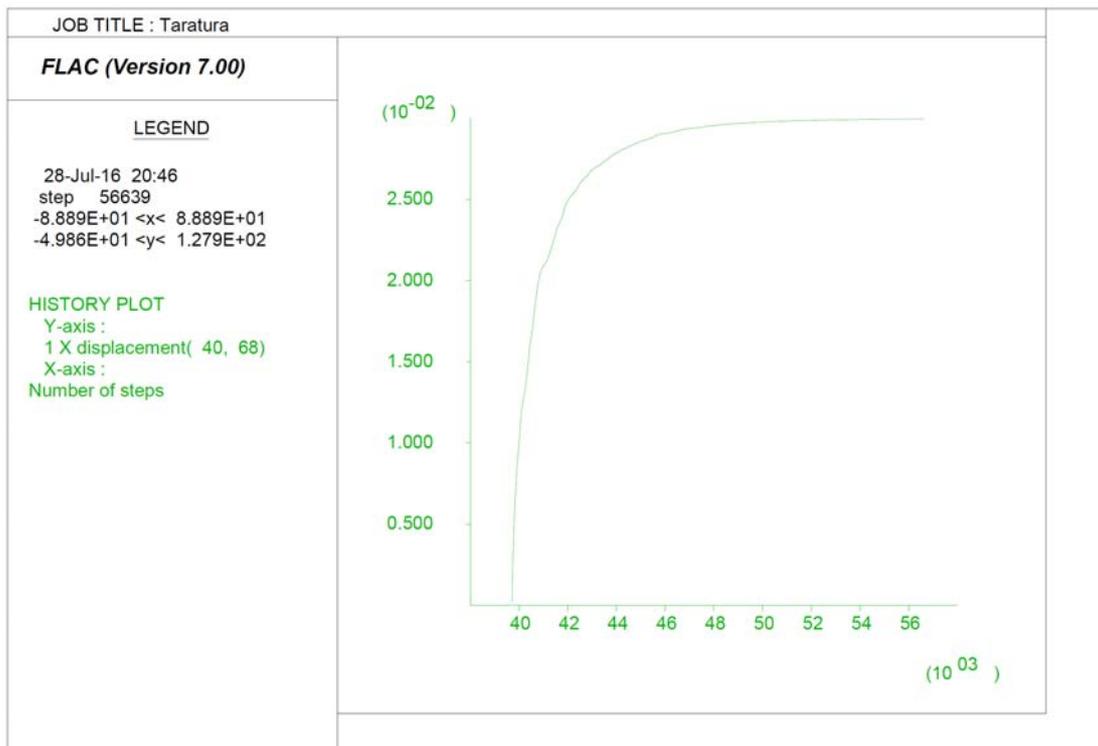
Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

Fase 1 In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

Fase 2 Questa fase, generalmente indicata come fase di taratura del modello, consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo. Il contributo statico fornito dalla porzione di ammasso oltre il fronte non ancora scavato viene simulato rilasciando il 71% delle forze di scavo. Tale valore è stato tarato sulla base delle indicazioni fornite dalle curve caratteristiche che, per il caso in analisi, indica una preconvergenza massima di circa 2.67 cm così come evidente dalla curva caratteristica riportata sotto.



L'output del programma di calcolo FLAC riporta lo spostamento del cavo in corrispondenza di questo step di calcolo sul piedritto sx del modello.



Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.750)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 200 / 100) con spritz beton (25 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.750)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a ½ D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton (E = 10 GPa) (fattore di rilascio = 0.907)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1.00).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

### 3.1.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti

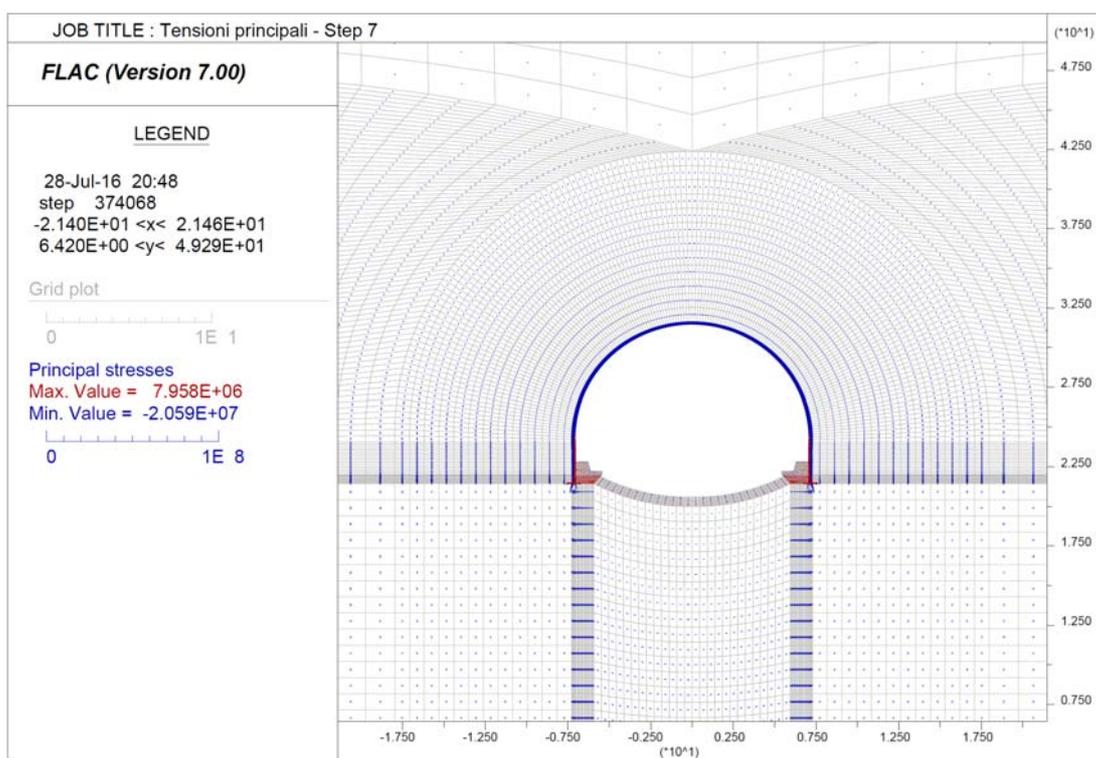
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

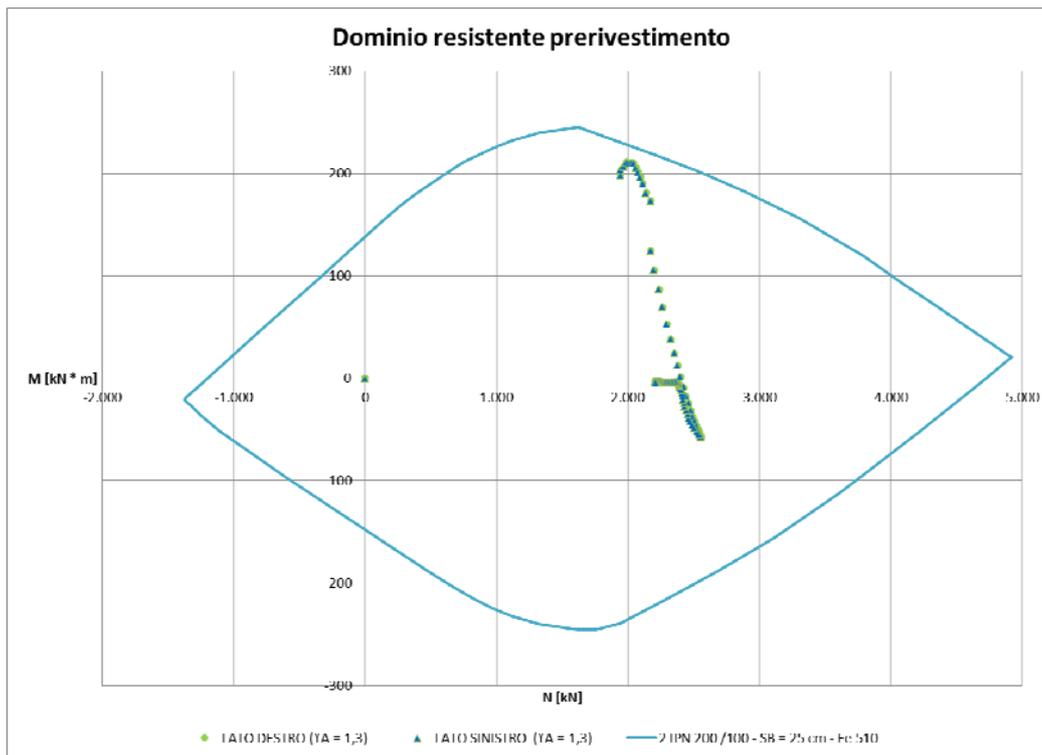
#### 3.1.1.1.1 Rivestimento di prima fase

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 200 / 100 – SB = 25 cm).



Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

**Verifica C.A. S.L.U. - File:**

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	25	1	20,34	1
			2	20,34	21

**Tipo Sezione**

Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

**Solecitazioni**

S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  kN  
M<sub>xEd</sub>  kNm  
M<sub>yEd</sub>  kNm

**P.to applicazione N**

Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
yN

**Tipo rottura**

Lato calcestruzzo - Acciaio snerato

**Metodo di calcolo**

S.L.U. +  S.L.U. -  Metodo n

**Tipo flessione**

Retta  Deviata

N° rett.

Calcola MRd  Dominio M-N

L<sub>0</sub>  cm Col. modello

Precompresso

**Materiali**

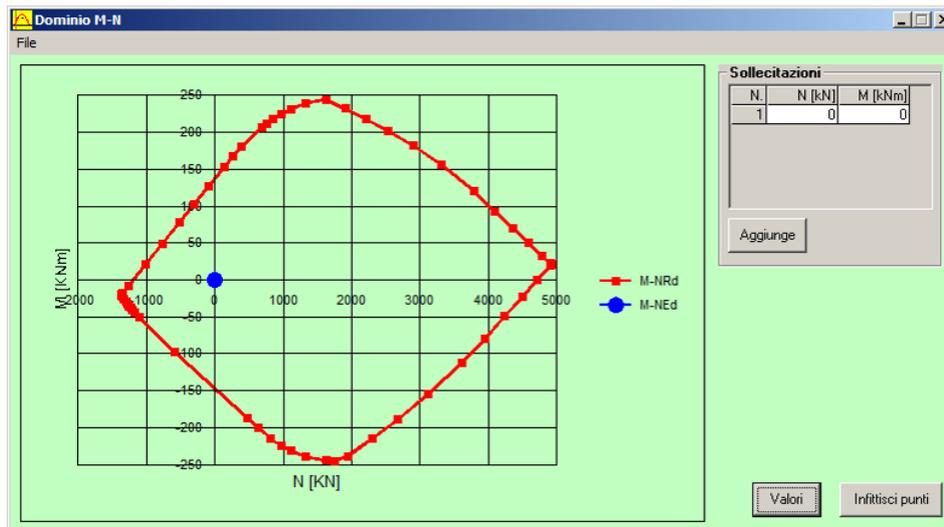
Fe510		C25/30	
$\epsilon_{su}$	67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	338,1 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3,5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	14,17 N/mm <sup>2</sup>
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0,8
$\epsilon_{syd}$	1,691 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9,75 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{s,adm}$	240 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0,6
		$\tau_{c1}$	1,829

**M<sub>xRd</sub>**  kN m

$\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>

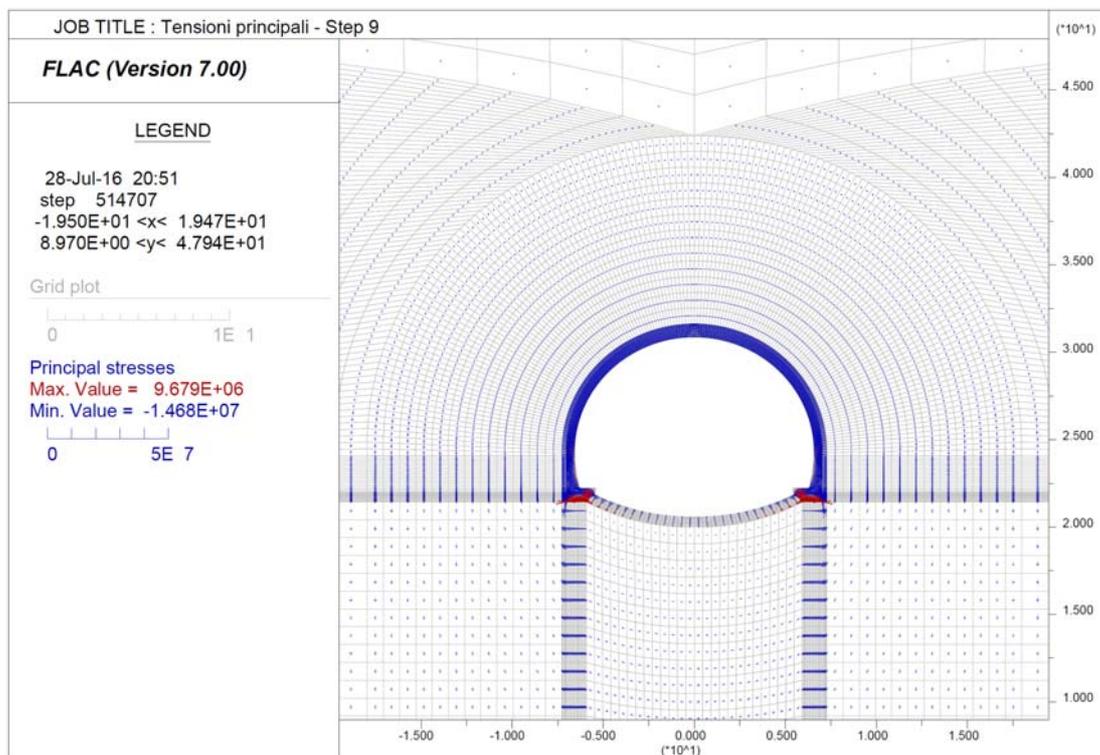
$\epsilon_c$   ‰  
 $\epsilon_s$   ‰

d  cm  
x  x/d   
 $\delta$



### 3.1.1.1.2 Rivestimento definitivo

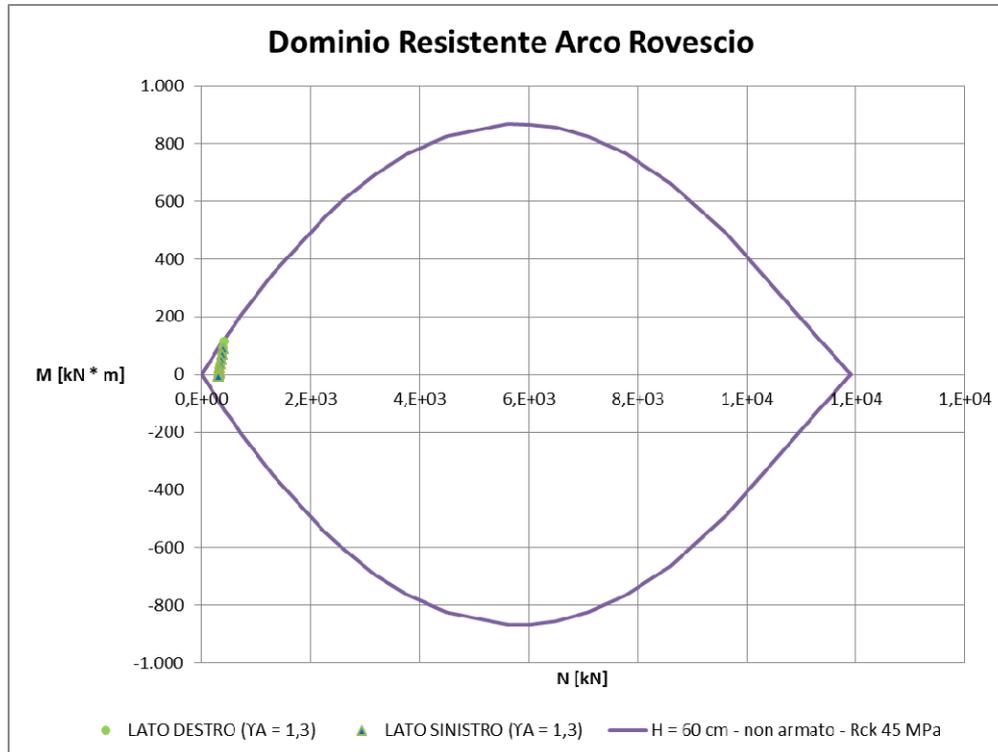
Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase). La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



## Arco rovescio - H = 60 cm

### Verifica SLU

#### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Stato limite di fessurazione

#### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	306	70
<i>Muretta dx</i>	306	70
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	242	-4

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 306 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 70 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67,5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3,5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19,83 N/mm²  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13,5 N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0,8  
 $\tau_{c1}$  2,257 N/mm²

$\sigma_c$  -2,863 N/mm²  
 $\sigma_s$  66,58 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0,3329 ‰  
 d 54,5 cm  
 x 21,37 x/d 0,3922  
 $\delta$  0,9302

Verifica N° iterazioni: 6

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 242 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -4 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67,5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3,5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19,83 N/mm²  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13,5 N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0,8  
 $\tau_{c1}$  2,257 N/mm²

$\sigma_c$  -0,47 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,02617 ‰

Verifica N° iterazioni: 0

Precompresso

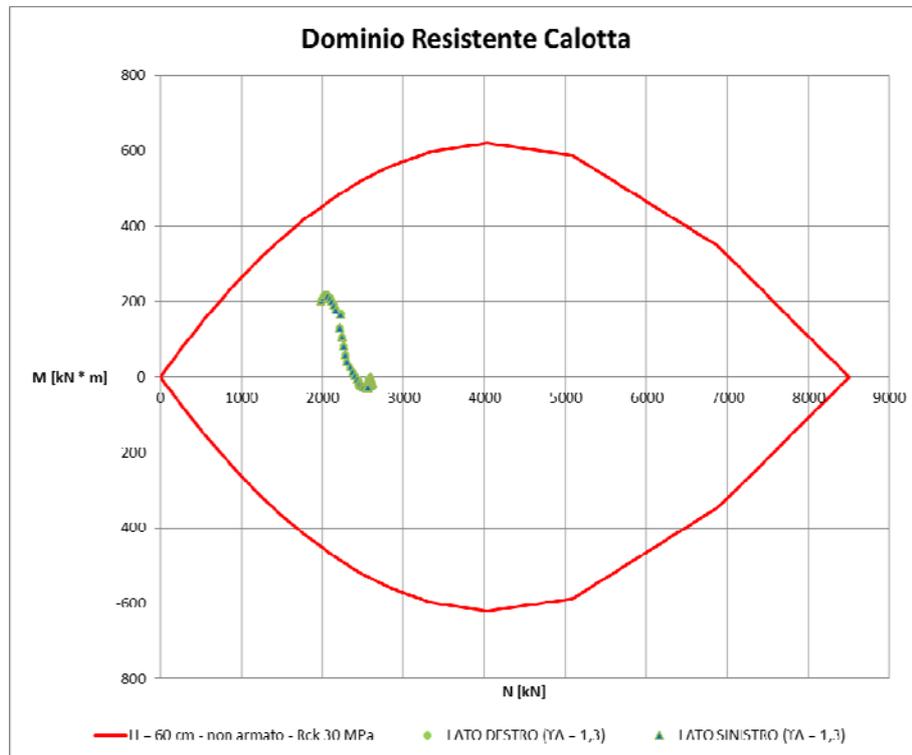
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione della muretta destra dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 600 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 545 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 55 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 47 [mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{f,1}$ = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{f,1}$ = 1 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,1}$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{f,2}$ = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{f,2}$ = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,2}$ = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	$f_{ck}$ = 35 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	$f_{ctm}$ = 3,2 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	$E_{cm}$ = 34077 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$ = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	$E_s$ = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	$\sigma_s$ = 66,58 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 213,7 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	$\alpha_e$ = 5,87 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	$A_s$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	$A_{c,eff.1}$ = 137500 [mm <sup>2</sup> ]
	$A_{c,eff.2}$ = 128767 [mm <sup>2</sup> ]
	$A_{c,eff.3}$ = 300000 [mm <sup>2</sup> ]
	$A_{c,eff.min}$ = 128767 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	$\rho_{p,eff}$ = 0,00002 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	$f_{ct,eff}$ = 3,2 [MPa]
Fattore di durata del carico	$k_t$ = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{min}$ = 0,000200 [-]
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{calc.}$ = -0,262843 [-]
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]$ = 0,000200 [-]
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	$\phi_{eq}$ = 1,00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	$s_{max,rif}$ = 237,5 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	$k_1$ = 0,800 [-]
	$k_2$ = 0,500 [-]
	$k_3$ = 3,400 [-]
	$k_4$ = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	$s_{r,max.1}$ = 7128 [mm]
	$s_{r,max.2}$ = 502 [mm]
	$s_{r,max}$ = 502 [mm]
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>	
	$w_{k,lim}$ = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	$w_k$ = 0,10 [mm]

## Calotta – H = 60 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

#### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Rene sx</i>	2005	-12
<i>Rene dx</i>	2001	-12
<i>Chiave</i>	1966	-21

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  2005 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -12 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

$\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm²  $\epsilon_{cu}$   ‰  
 $E_s$   N/mm²  $f_{cd}$   ‰  
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ‰  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$   N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm²  $\tau_{co}$   N/mm²  
 $\tau_{c1}$   N/mm²

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\epsilon_{ci}$   ‰

Verifica  
 N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  2001 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -12 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

$\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm²  $\epsilon_{cu}$   ‰  
 $E_s$   N/mm²  $f_{cd}$   ‰  
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ‰  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$   N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm²  $\tau_{co}$   N/mm²  
 $\tau_{c1}$   N/mm²

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\epsilon_{ci}$   ‰

Verifica  
 N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Solecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 1966 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -21 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C25/30  
 $\epsilon_{su}$  67,5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3,5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  14,17  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8 ?  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  9,75  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0,6  
 $\tau_{c1}$  1,829

$\sigma_c$  -3,627 N/mm²  
 $\epsilon_{ci}$  -0,2243 ‰

Verifica  
 N° iterazioni: 0

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

### 3.2 Sezione tipo B0 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	250
	$\varphi'$	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	200	200
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B0.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una copertura pari a 50 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

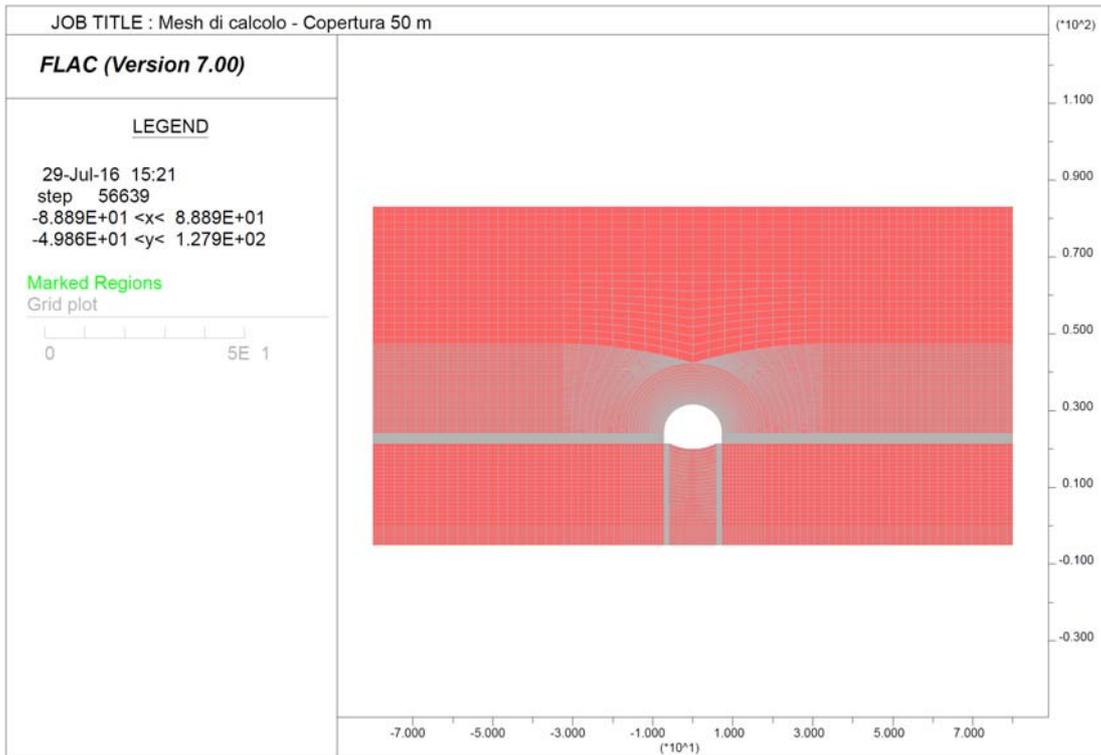
Il prerinvestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

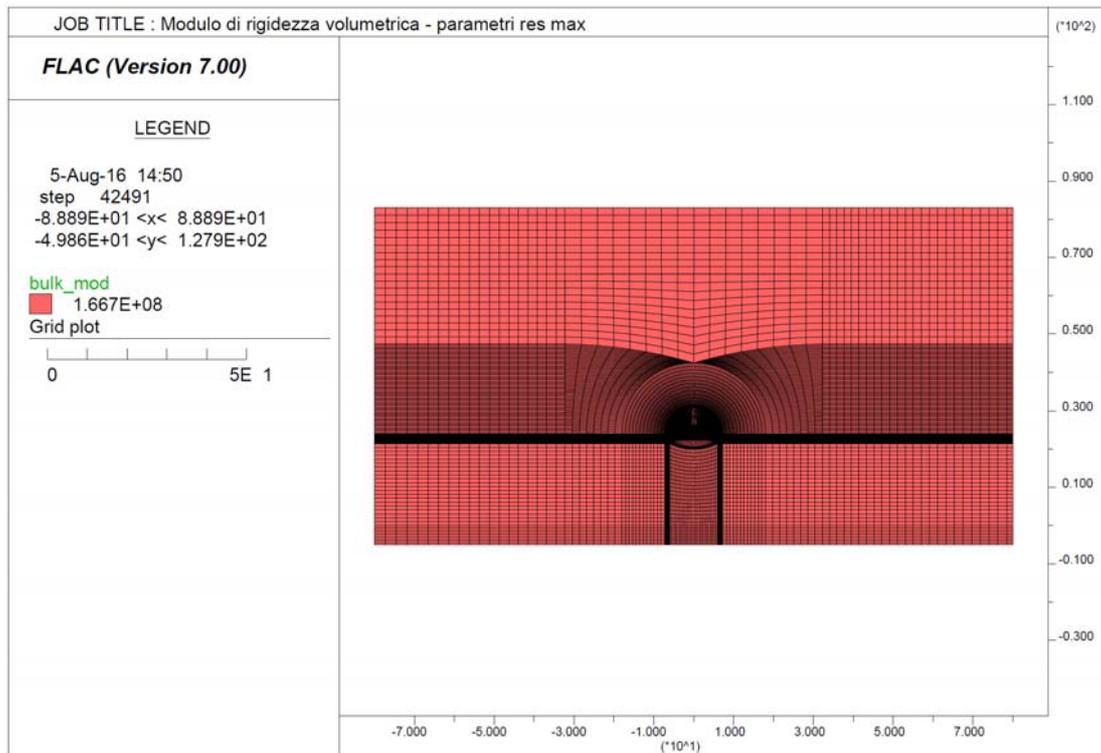
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

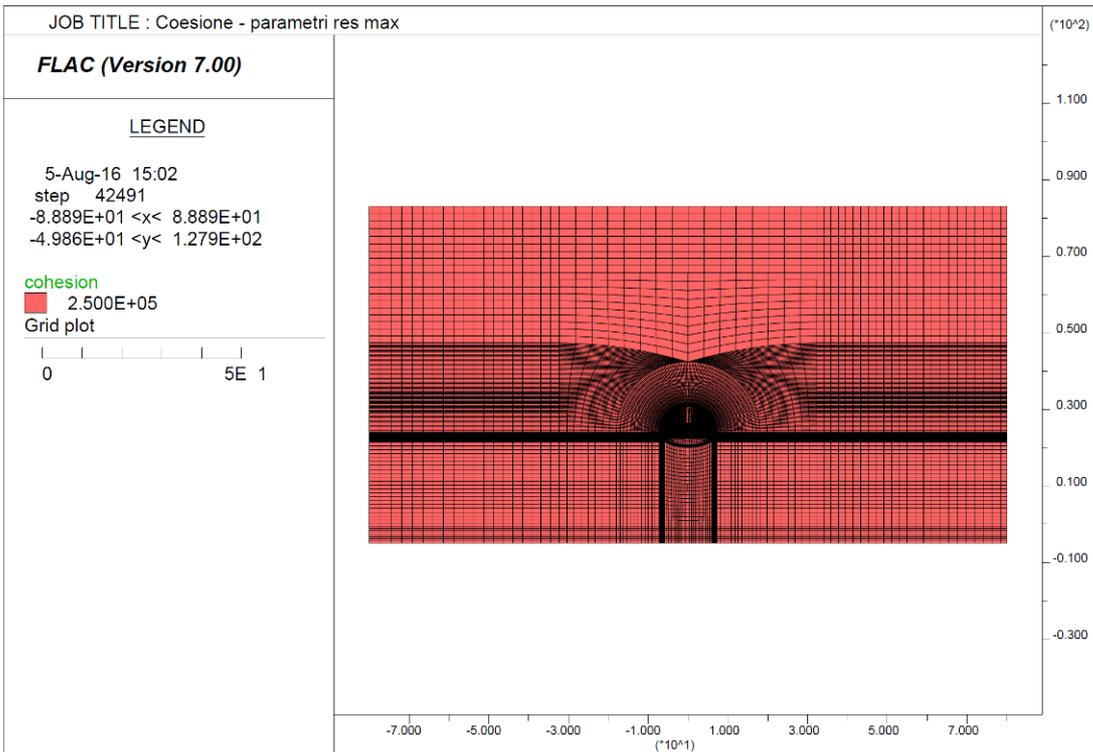
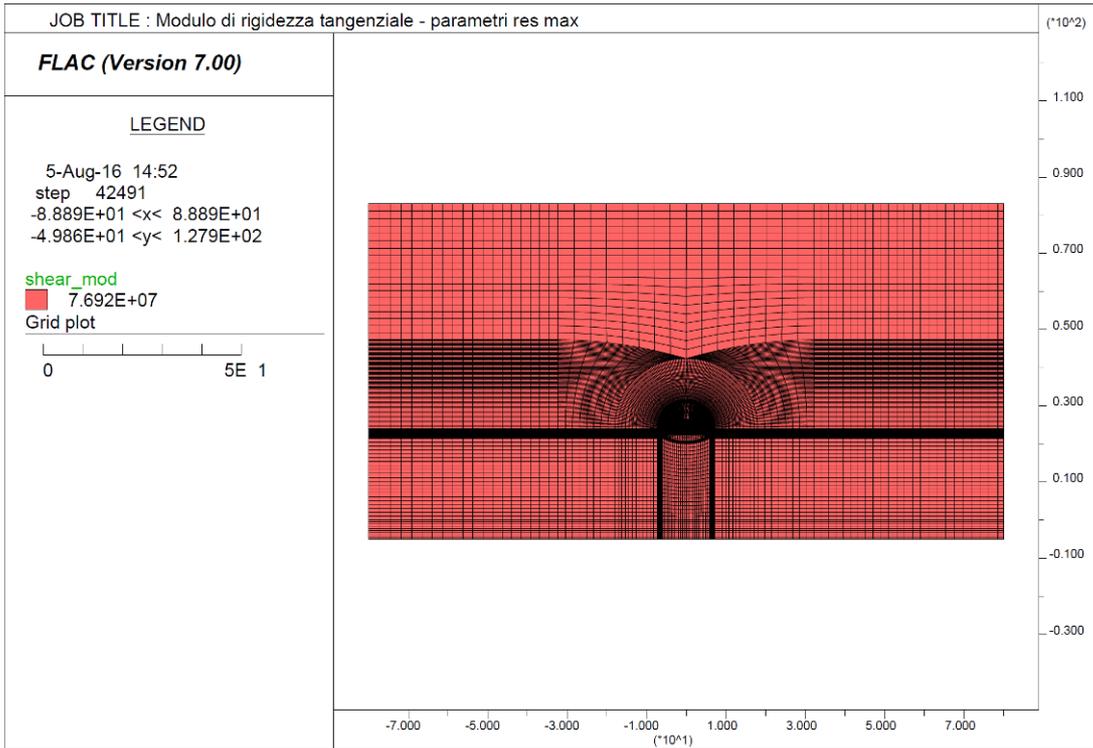
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

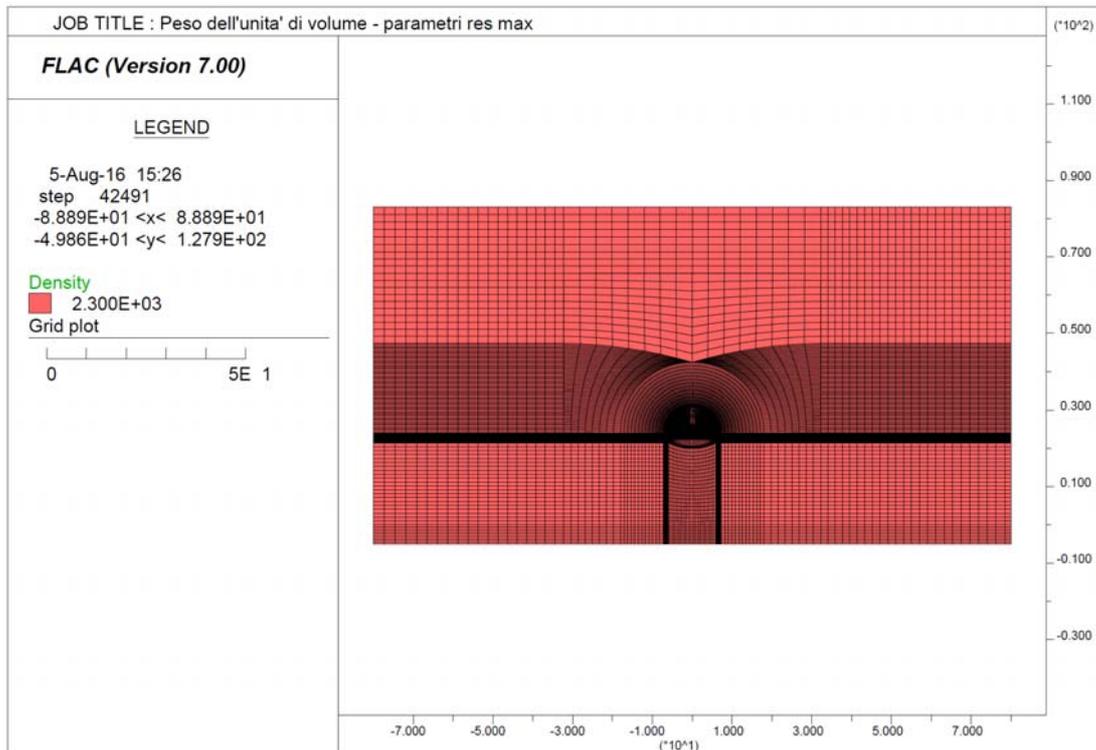
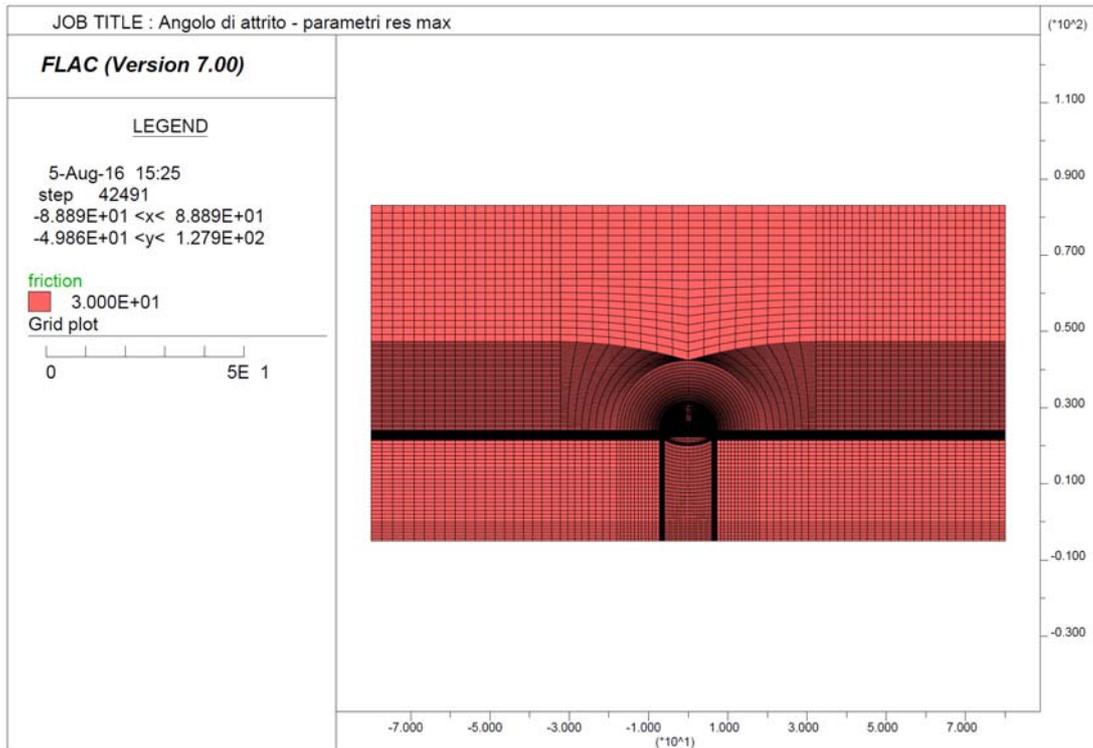
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo B0 - parametri res max - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	75,5%	2,26	-
Step 3	Scavo	1	78,9%	0,27*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	78,9%	0,27*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	92,2%	0,81*	0,53
Step 6	Avanzamento fino a deformazioni esaurite ( E SB = 31 Gpa)	-	100,0%	1,22*	0,95
Step 7	Getto arco rovescio e muretta	-	100,0%	-	0,95
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	0,95
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	0,95

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

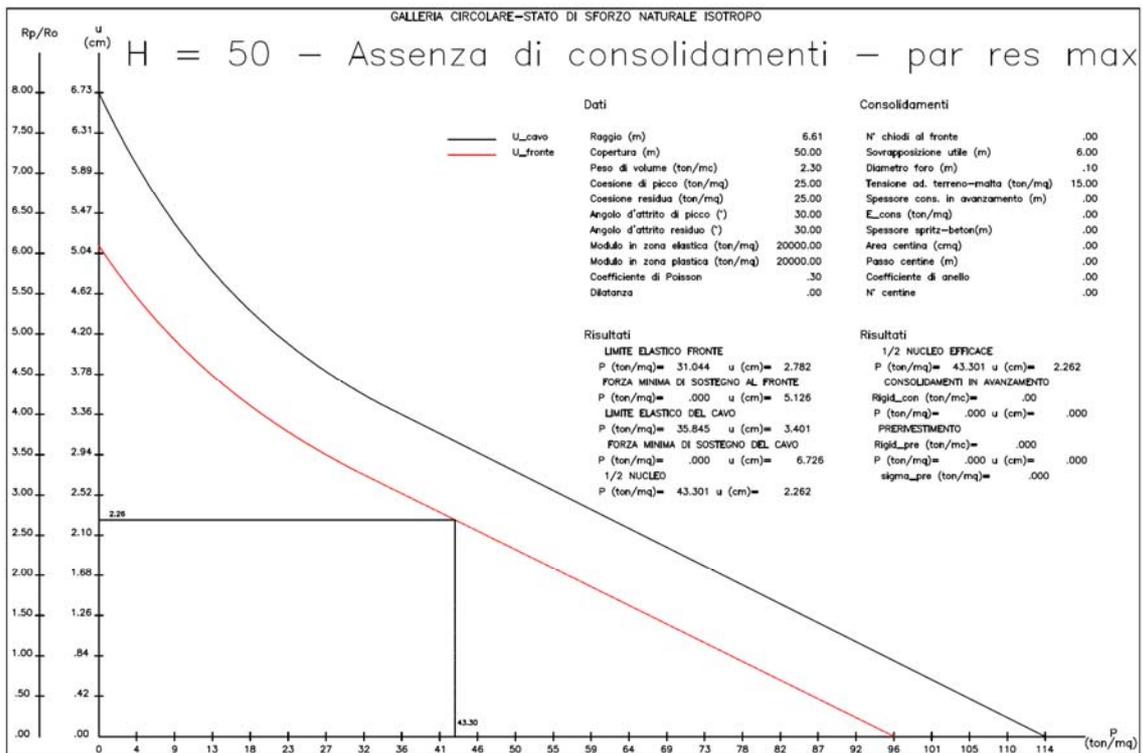
### 3.2.1 Fasi di calcolo

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il prriverimento e per il rivestimento definitivo.

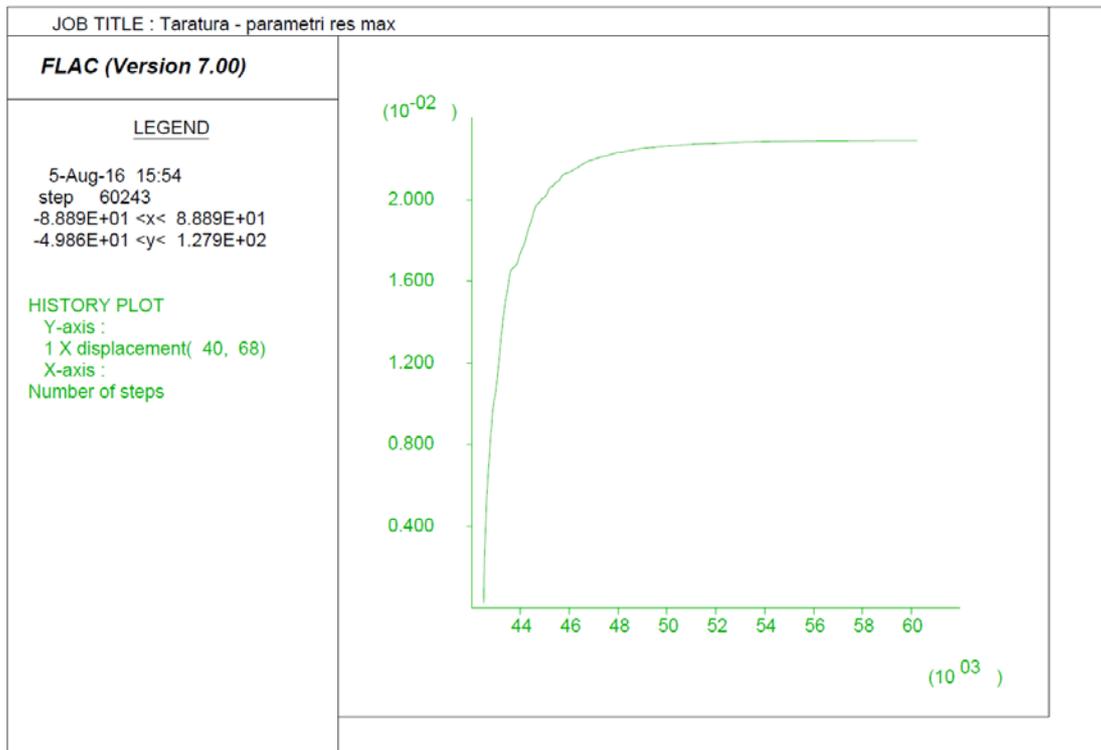
Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

Fase 1 In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

Fase 2 Questa fase, generalmente indicata come fase di taratura del modello, consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo. Il contributo statico fornito dalla porzione di ammasso oltre il fronte non ancora scavato viene simulato rilasciando il 75.5% delle forze di scavo. Tale valore è stato tarato sulla base delle indicazioni fornite dalle curve caratteristiche che, per il caso in analisi, indica una preconvergenza massima di circa 2.26 cm così come evidente dalla curva caratteristica riportata sotto.



L'output del programma di calcolo FLAC riporta lo spostamento del cavo in corrispondenza di questo step di calcolo sul piedritto sx del modello.



Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della cerniera (fattore di rilascio pari a 0.789)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 1800 / 100) con spritz beton (20 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.789)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a  $\frac{1}{2}$  D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton ( $E = 10$  GPa) (fattore di rilascio = 0.922)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1.00).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

#### *3.2.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti*

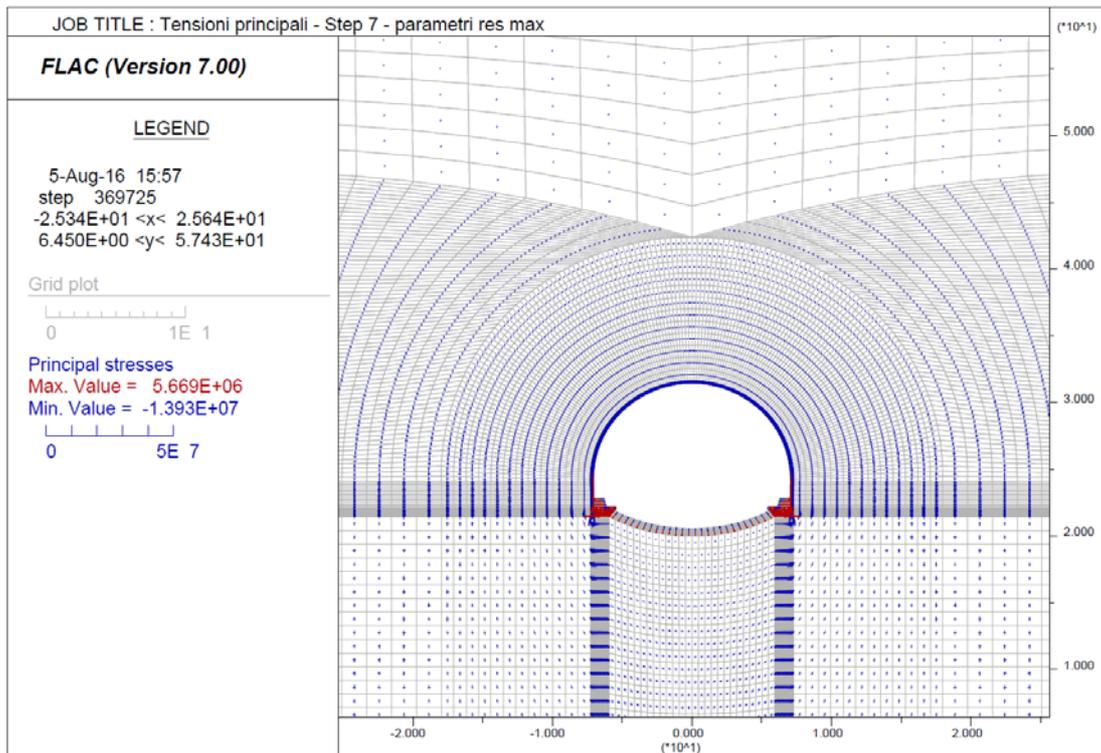
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

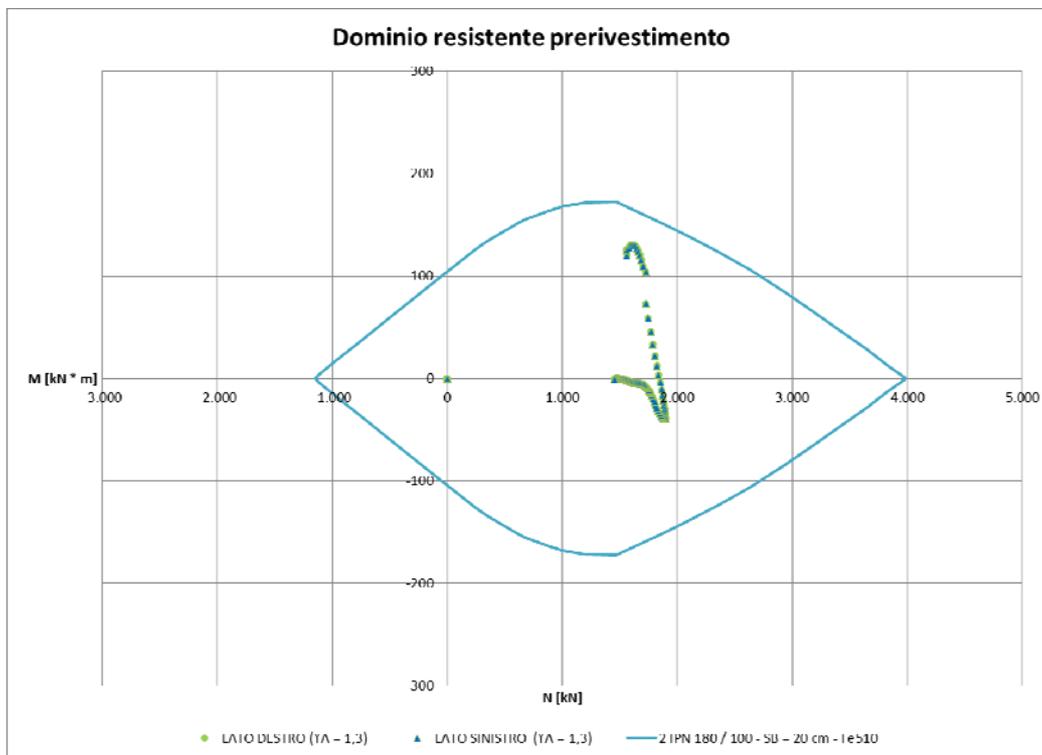
##### *3.2.1.1.1 Rivestimento di prima fase*

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 180 / 100 – SB = 20 cm).



Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	20	1	17,056	1
			2	17,056	19

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 kN  
 M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura  
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo  
 S.L.U. +  S.L.U. -  
 Metodo n

Tipo flessione  
 Retta  Deviata

N° rett. 100

Calcola MRd Dominio M-N

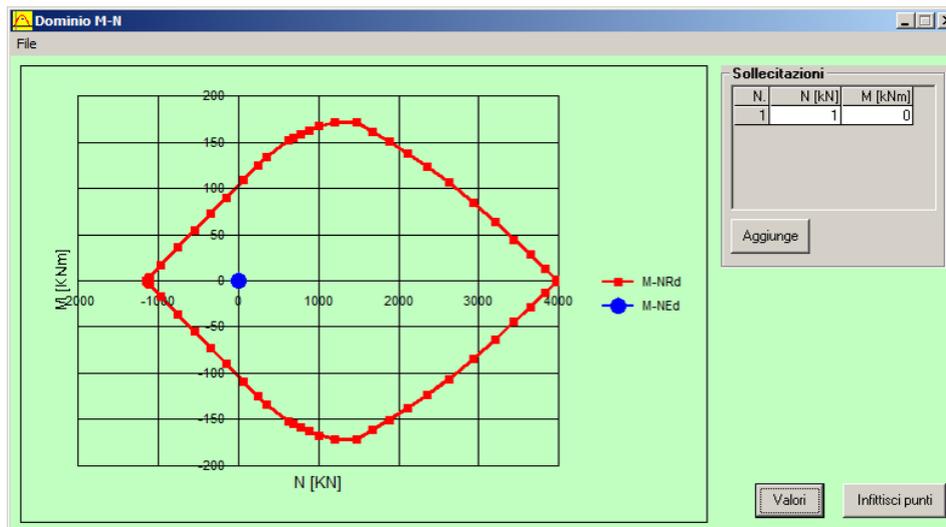
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello

Precompresso

Materiali

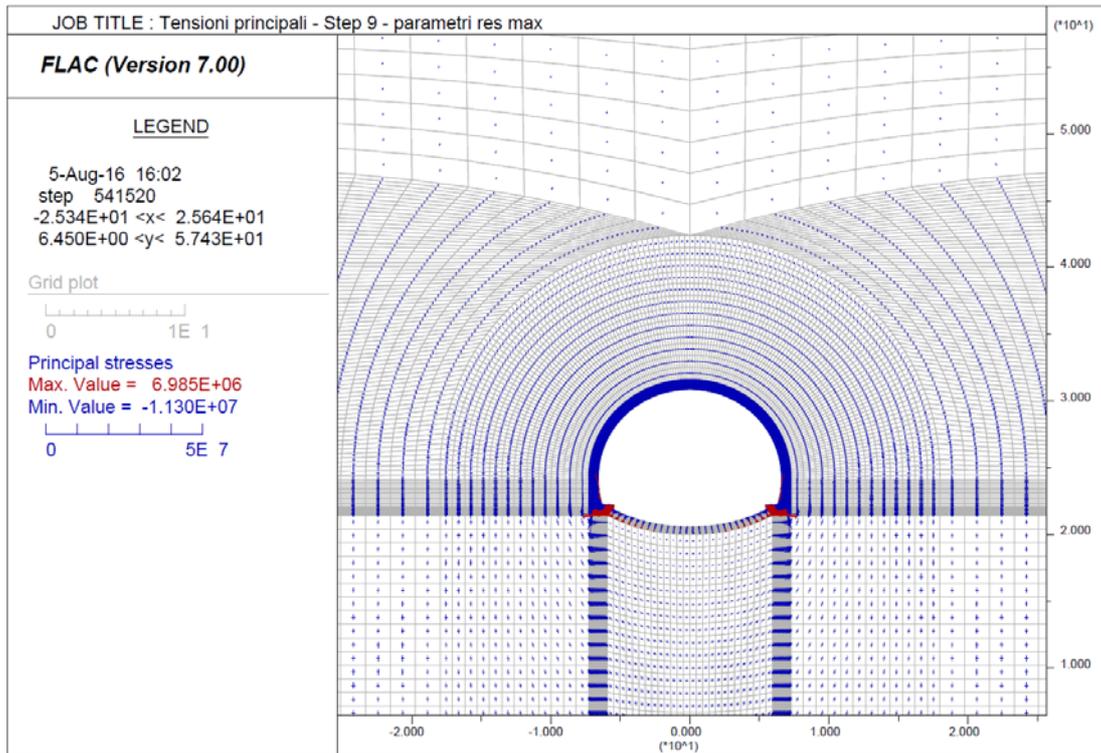
Fe510	C25/30
$\epsilon_{su}$ 67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 338,1 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$ 3,5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$ 14,17
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0,8
$\epsilon_{syd}$ 1,691 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 9,75
$\sigma_{s,adm}$ 240 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$ 0,6
	$\tau_{c1}$ 1,829

M<sub>xRd</sub> 104,5 kN m  
 $\sigma_c$  -14,17 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_c$  3,5 ‰  
 $\epsilon_s$  40,51 ‰  
 d 19 cm  
 x 1,511 x/d 0,07953  
 $\delta$  0,7



### 3.2.1.1.2 Rivestimento definitivo

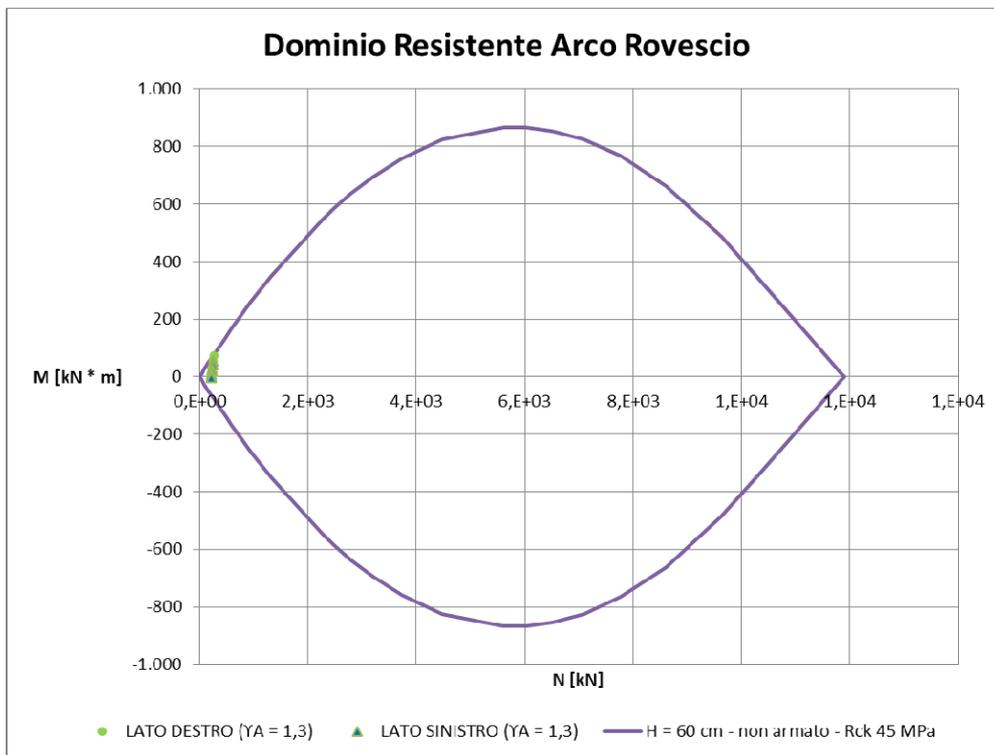
Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase). La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



**Arco rovescio - H = 60 cm**

**Verifica SLU**

**Momento flettente**



## Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punte tensionali
- Stato limite di fessurazione

### Verifica nei confronti delle Punte tensionali

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

Elemento	N [kN]	M [kN * m]
Muretta sx	198	42
Muretta dx	198	42
Mezzeria Arco rovescio	164	-3

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. Key sections include:

- Titolo:** Empty text field.
- N° strati barre:** 2
- Table 1:**

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60
- Table 2:**

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5
- Sollecitazioni:**
  - S.L.U. / Metodo n
  - N<sub>Ed</sub>: 198 kN
  - M<sub>xEd</sub>: 42 kNm
  - M<sub>yEd</sub>: 0
- P.to applicazione N:**
  - Centro (selected)
  - Baricentro cls
  - Coord. [cm]: xN=0, yN=0
- Metodo di calcolo:**
  - S.L.U.+ (selected)
  - S.L.U.-
  - Metodo n
- Materiali:**
  - B450C:** ε<sub>su</sub> 67,5‰, f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm², E<sub>s</sub> 200.000 N/mm², E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15, ε<sub>syd</sub> 1,957‰, σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm²
  - C35/45:** ε<sub>c2</sub> 2‰, ε<sub>cu</sub> 3,5‰, f<sub>cd</sub> 19,83, f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8, σ<sub>c,adm</sub> 13,5, τ<sub>co</sub> 0,8, τ<sub>c1</sub> 2,257
- Other parameters:**
  - σ<sub>c</sub>: -1,502 N/mm²
  - σ<sub>s</sub>: 24,05 N/mm²
  - ε<sub>s</sub>: 0,1202‰
  - d: 54,5 cm
  - x: 26,36, x/d: 0,4837
  - δ: 1
- Verifica:**
  - N° iterazioni: 6
  - Precompresso:

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 164 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -3 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67,5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3,5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19,83  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13,5  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0,8  
 $\tau_{c1}$  2,257

$\sigma_c$  -0,3233 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,01744 ‰

Verifica N° iterazioni: 0

Precompresso

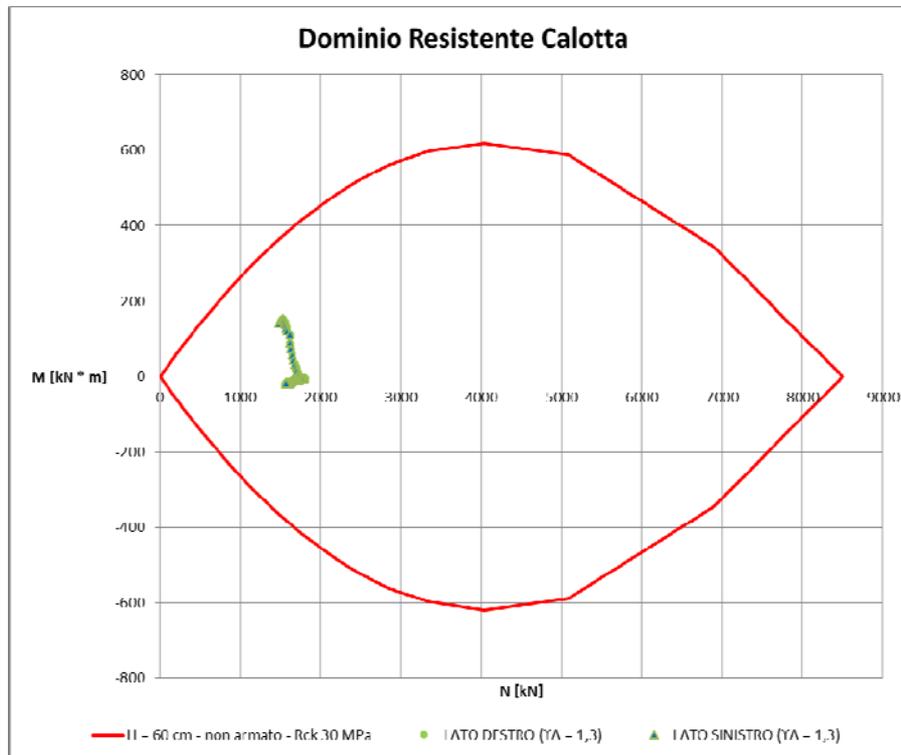
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione della muretta destra dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 600 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 545 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 55 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 47 [mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{r,1}$ = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{r,1}$ = 1 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,1}$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{r,2}$ = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{r,2}$ = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,2}$ = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	$f_{ck}$ = 35 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	$f_{ctm}$ = 3,2 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	$E_{cm}$ = 34077 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$ = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	$E_s$ = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	$\sigma_s$ = 24,05 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 263,6 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	$\alpha_e$ = 5,87 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	$A_s$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	$A_{c,eff,1}$ = 137500 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,2}$ = 112133 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,3}$ = 300000 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,min}$ = 112133 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	$\rho_{p,eff}$ = 0,00003 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	$f_{ct,eff}$ = 3,2 [MPa]
Fattore di durata del carico	$k_t$ = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{min}$ = 0,000072 [-]
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{calc.}$ = -0,229065 [-]
	<b><math>[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]</math> = 0,000072 [-]</b>
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	$\phi_{eq}$ = 1,00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	$s_{max,ref}$ = 237,5 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	$k_1$ = 0,800 [-] $k_2$ = 0,500 [-] $k_3$ = 3,400 [-] $k_4$ = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	$s_{r,max,1}$ = 6228 [mm]
	$s_{r,max,2}$ = 437 [mm]
	<b><math>s_{r,max}</math> = 437 [mm]</b>
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	$w_{k,lim}$ = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b><math>w_k</math> = 0,03 [mm]</b>

## Calotta – H = 60 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Rene sx</i>	1308	-6
<i>Rene dx</i>	1313	-5
<i>Chiave</i>	1204	-13

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta, e del rene dx.

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN  yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C25/30	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	14.17
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9.75
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0.6
		$\tau_{c1}$	1.829

$\sigma_c$  -2.28 N/mm<sup>2</sup>

Verifica N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN  yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C25/30	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	14.17
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9.75
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0.6
		$\tau_{c1}$	1.829

$\sigma_c$  -2.272 N/mm<sup>2</sup>

Verifica N° iterazioni:

Precompresso



### 3.3 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza minimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	220
	$\varphi'$	[°]	25 – 30	25
	E	[MPa]	200	200
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B2.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una condizione di copertura pari a 50 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

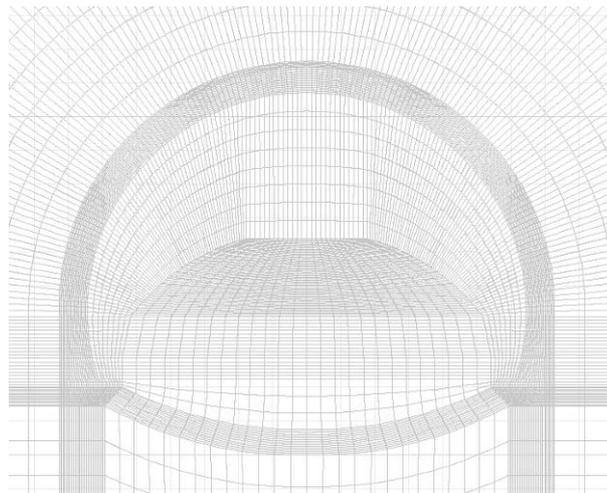
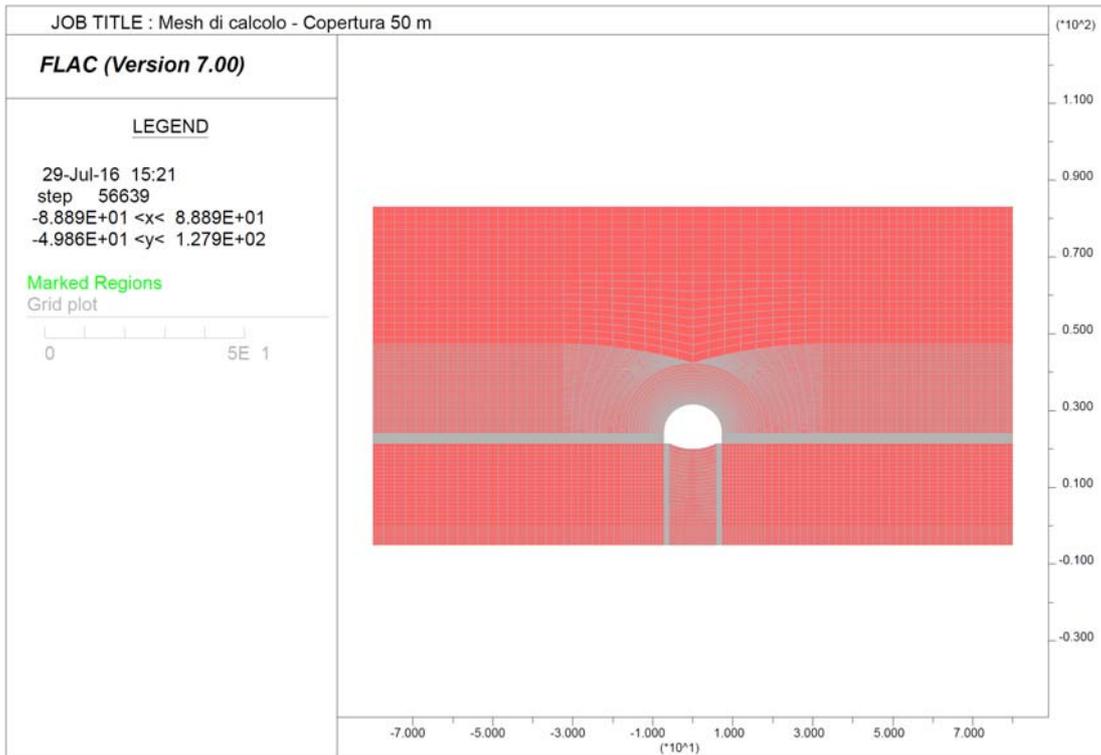
Il prerivestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

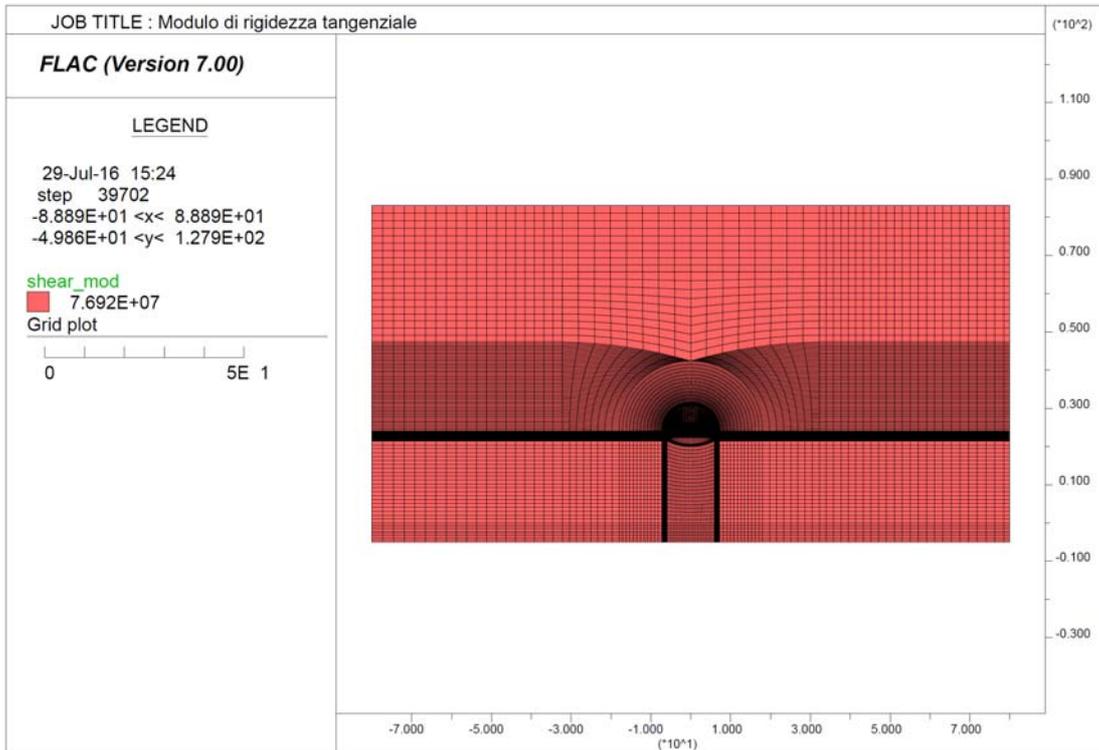
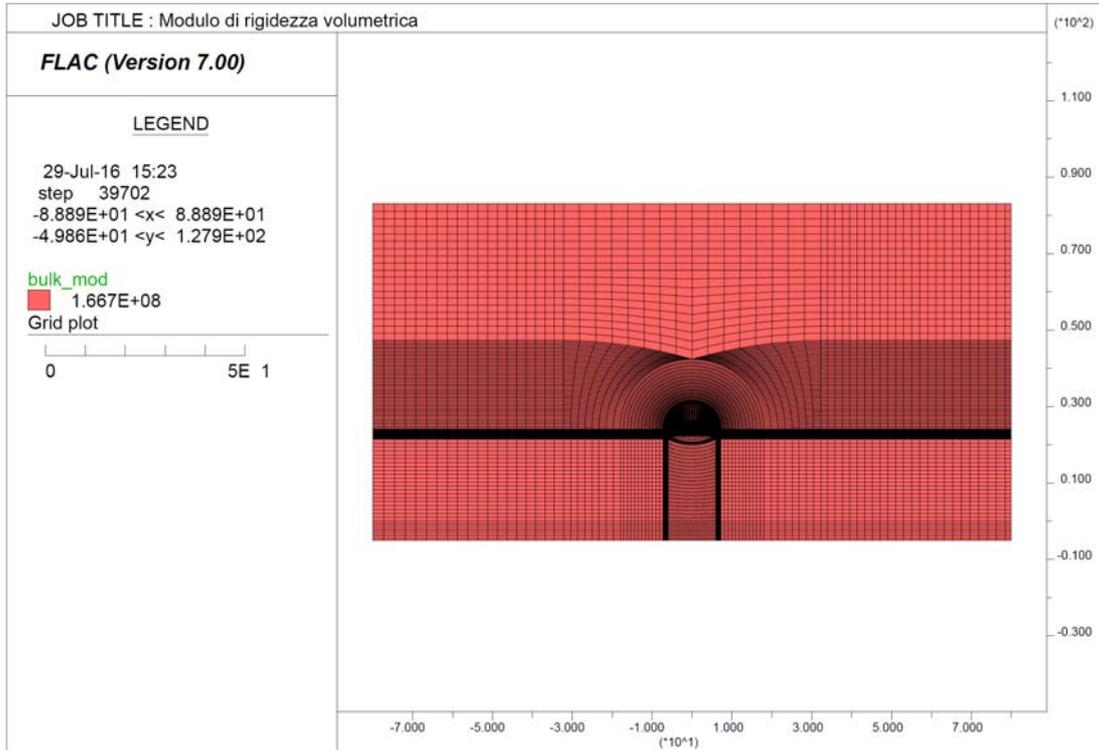
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

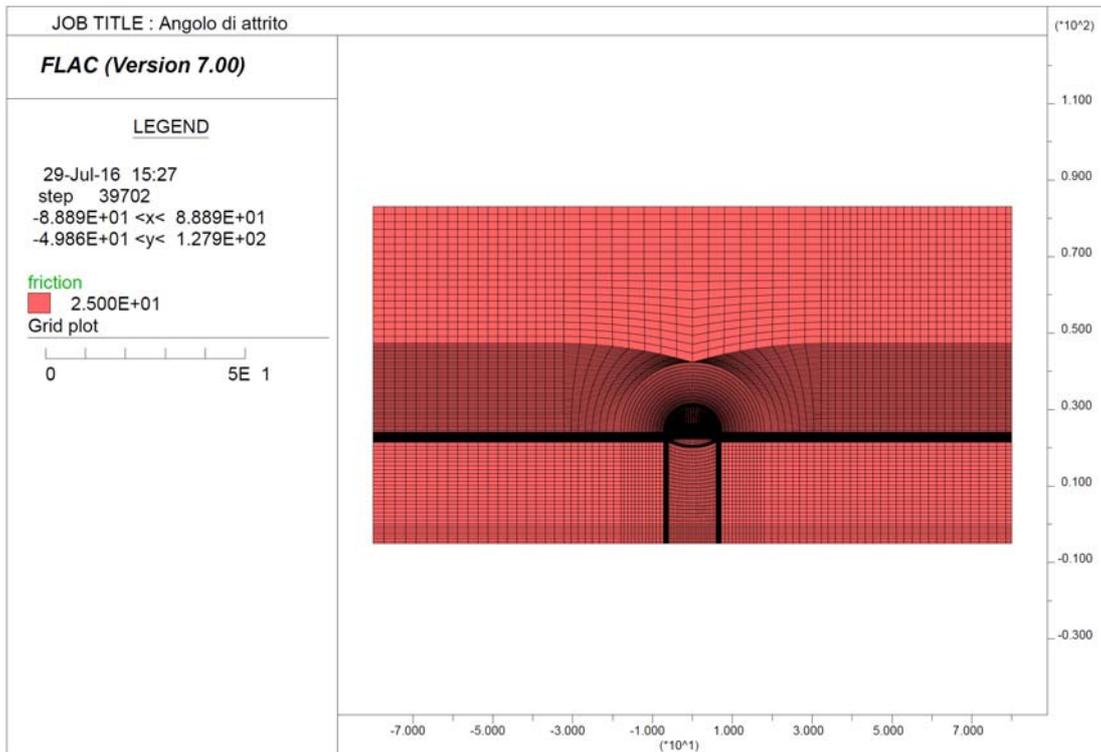
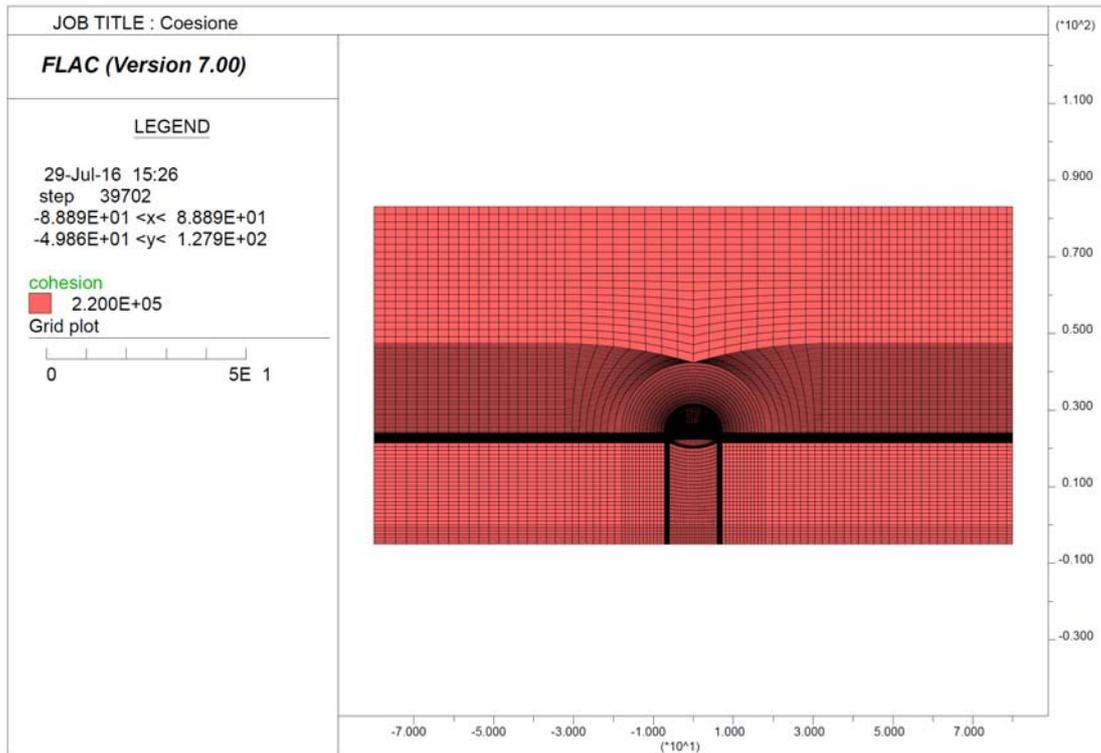
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

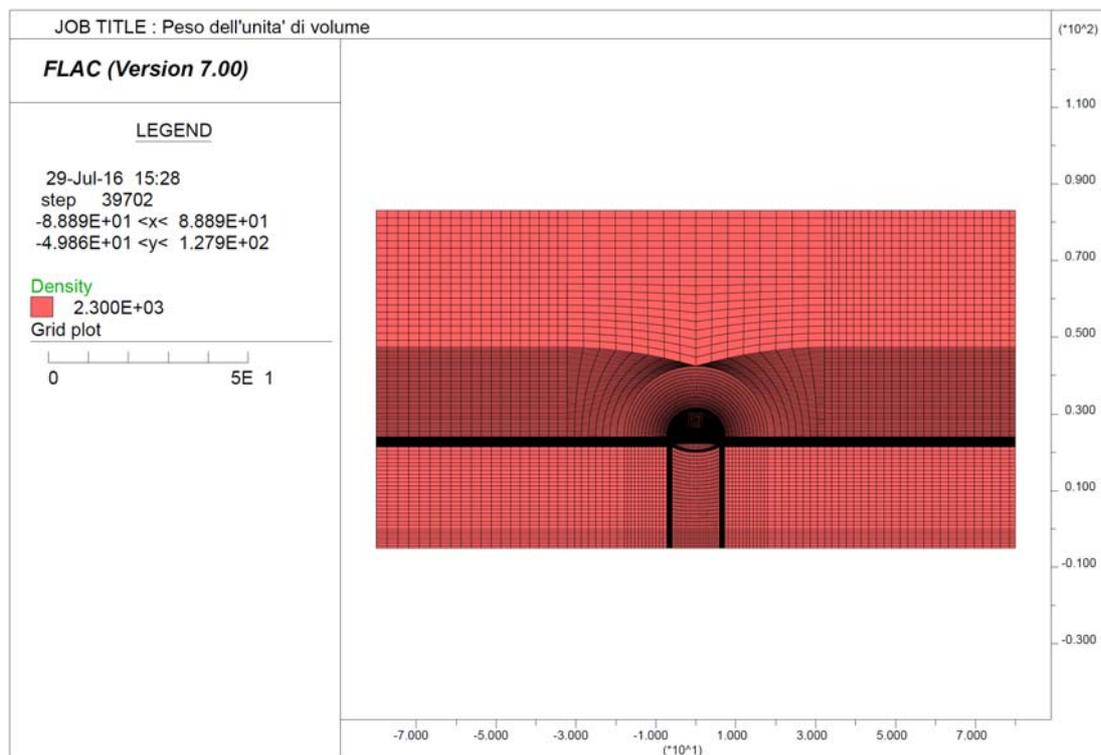
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo B2 - par res min- Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	59,0%	2,09	-
Step 3	Scavo	1	64,6%	0,32*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	64,6%	0,32*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	86,9%	1,45*	1,13
Step 6	Avanzamento 2 D ( E SB = 31 Gpa)	29	95,1%	2,09*	1,77
Step 7	Getto arco rovescio e muretta a 2D e avanzamento fino a deformazioni esaurite	-	100,0%	-	1,77
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	1,77
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	1,77

\*spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2- taratura)

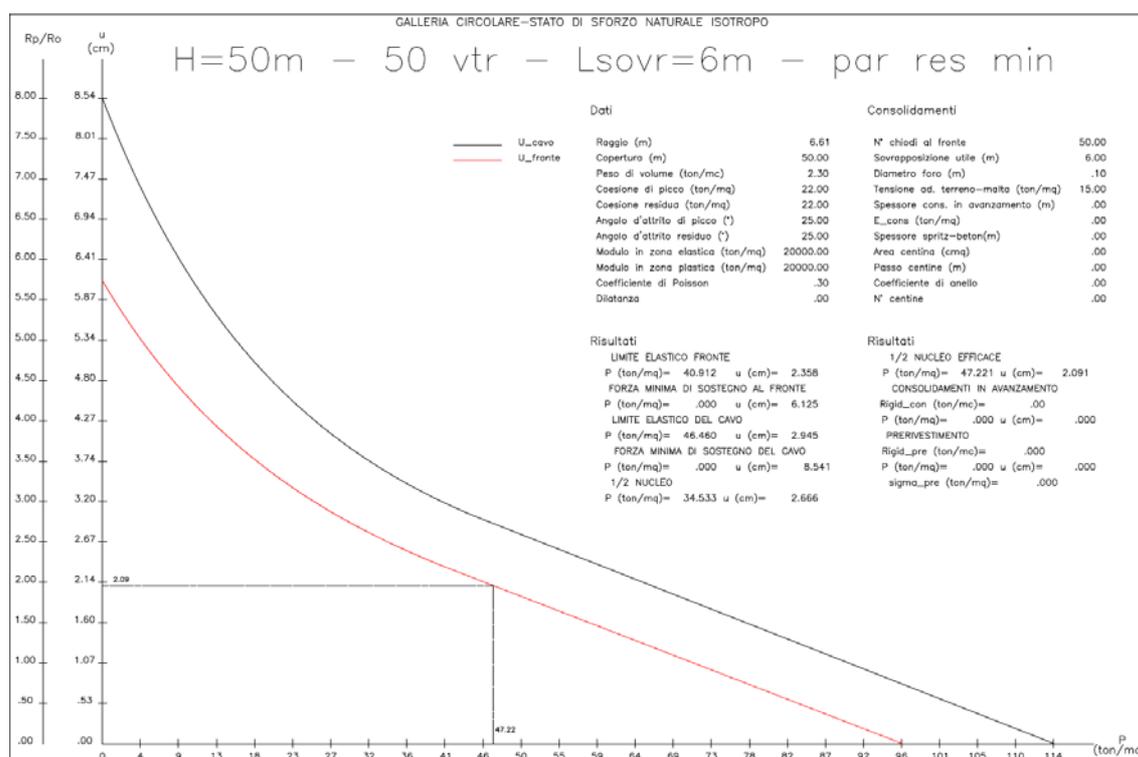
### 3.3.1 Fasi di calcolo

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il priverivestimento e per il rivestimento definitivo.

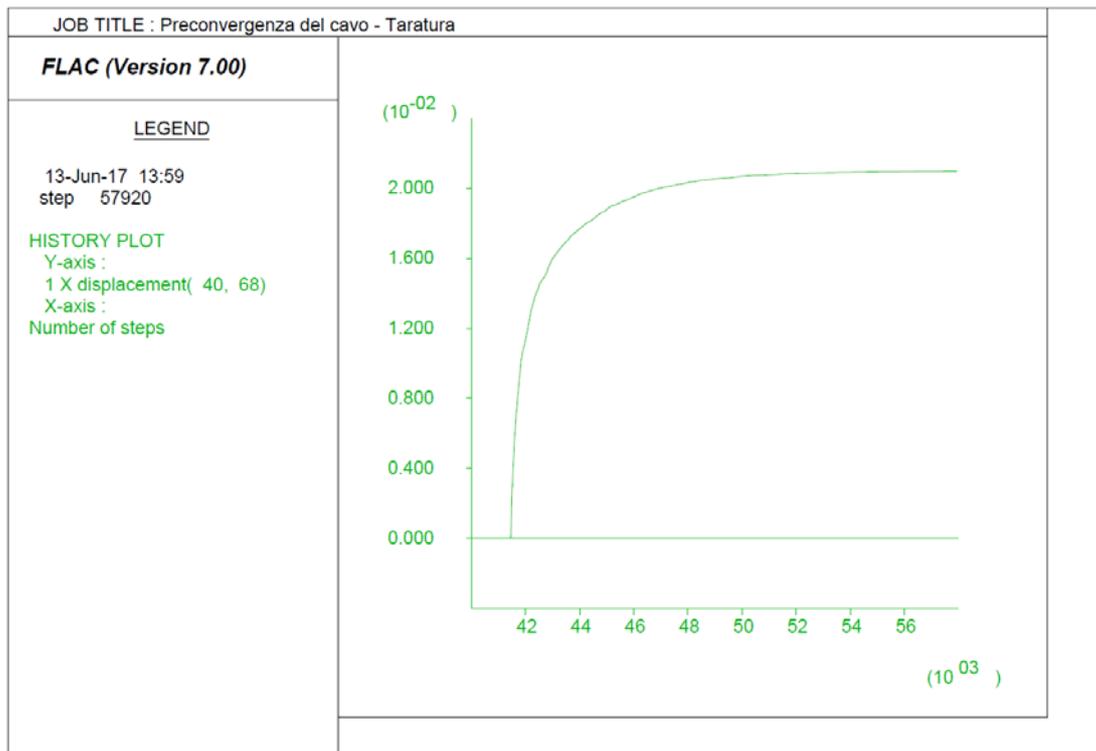
Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

**Fase 1** In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

**Fase 2** Questa fase, generalmente indicata come fase di taratura del modello, consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo. Il contributo statico fornito dalla porzione di ammasso oltre il fronte non ancora scavato viene simulato rilasciando il 59% delle forze di scavo. Tale valore è stato tarato sulla base delle indicazioni fornite dalle curve caratteristiche che, per il caso in analisi, indica una preconvergenza massima di circa 2.09 cm così come evidente dalla curva caratteristica riportata sotto.



L'output del programma di calcolo FLAC riporta lo spostamento del cavo in corrispondenza di questo step di calcolo sul piedritto sx del modello.



Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.646)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 200 / 100) con spritz beton (30 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.646)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a  $\frac{1}{2}$  D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton ( $E = 10$  GPa) (fattore di rilascio = 0.869)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino a 2 D (fattore di rilascio = 0.962).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1.00)

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

### 3.3.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti

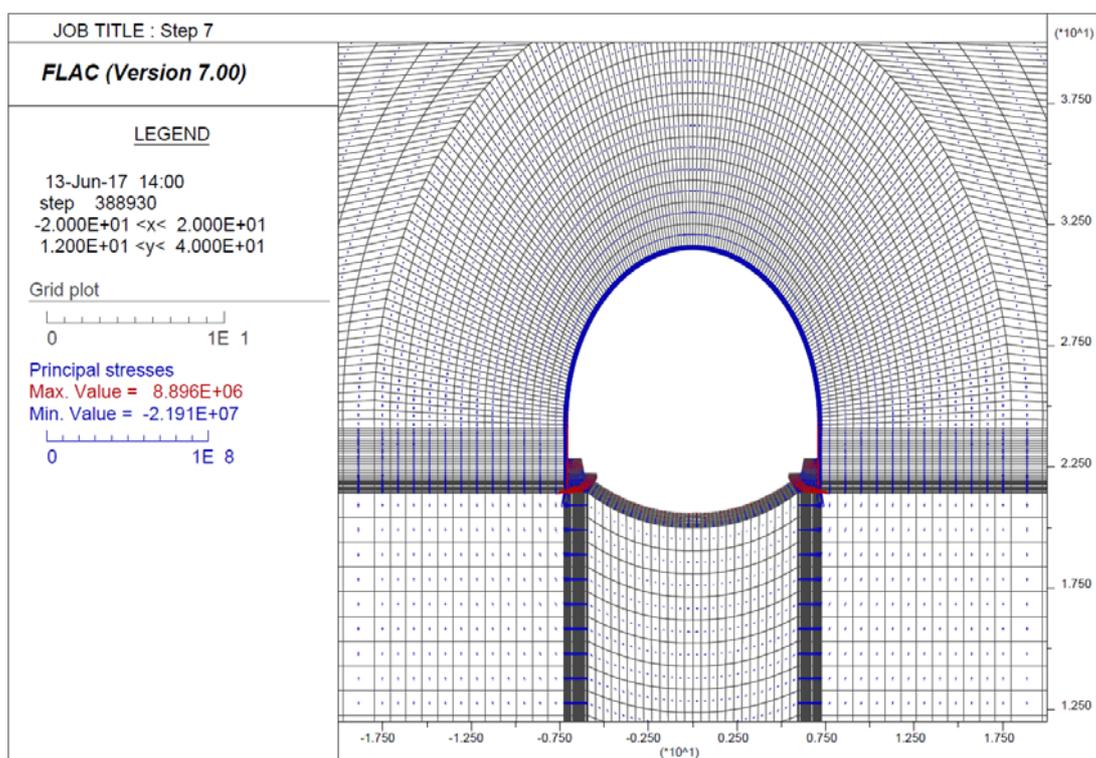
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

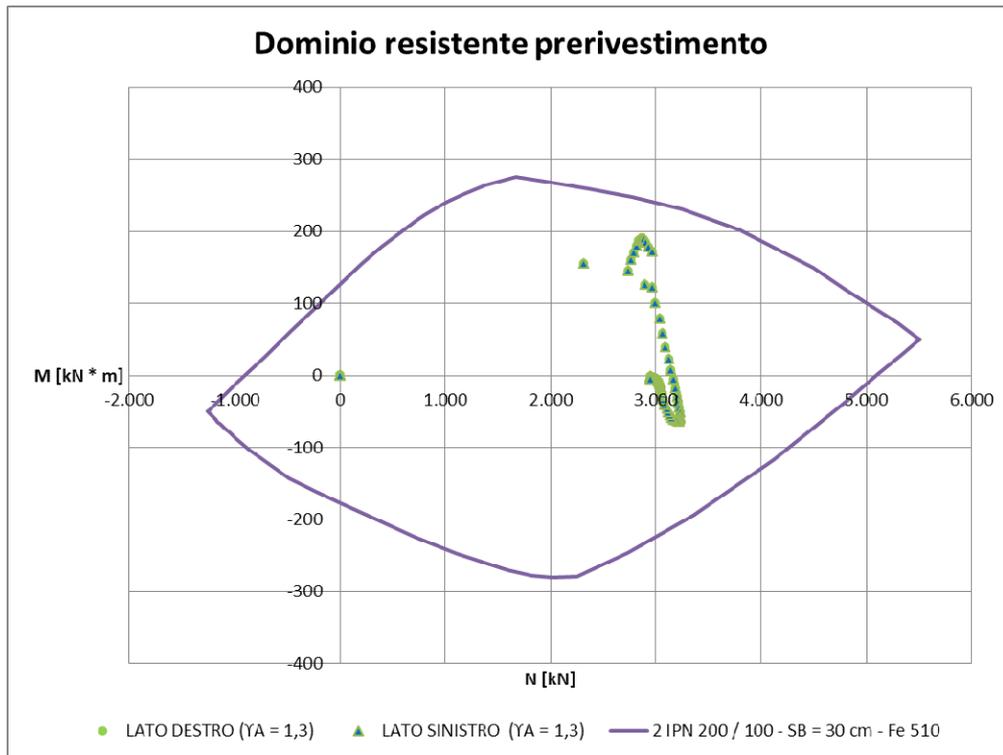
#### 3.3.1.1.1 Rivestimento di prima fase

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 200 / 100 – SB = 30 cm).



Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

TITOLO :

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	30

N°	As [cm²]	d [cm]
1	20,34	1
2	20,34	21

Tipo Sezione  
 Rettan.re     Trapezi  
 a T     Circolare  
 Rettangoli     Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.     Metodo n

P.to applicazione N  
 Centro     Baricentro cls  
 Coord.[cm]    xN     yN

Tipo rottura

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+     S.L.U.-  
 Metodo n

Tipo flessione  
 Retta     Deviata

N° rett.

Calcola MRd    Dominio M-N  
 L<sub>0</sub>  cm    Col. modello

Precompresso

Materiali

Fe510		C25/30	
$\epsilon_{su}$	67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	338,1 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3,5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	14,17
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0,8
$\epsilon_{syd}$	1,691 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9,75
$\sigma_{s,adm}$	240 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0,6
		$\tau_{c1}$	1,829

M<sub>xRd</sub>  kN m

$\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_s$   N/mm<sup>2</sup>

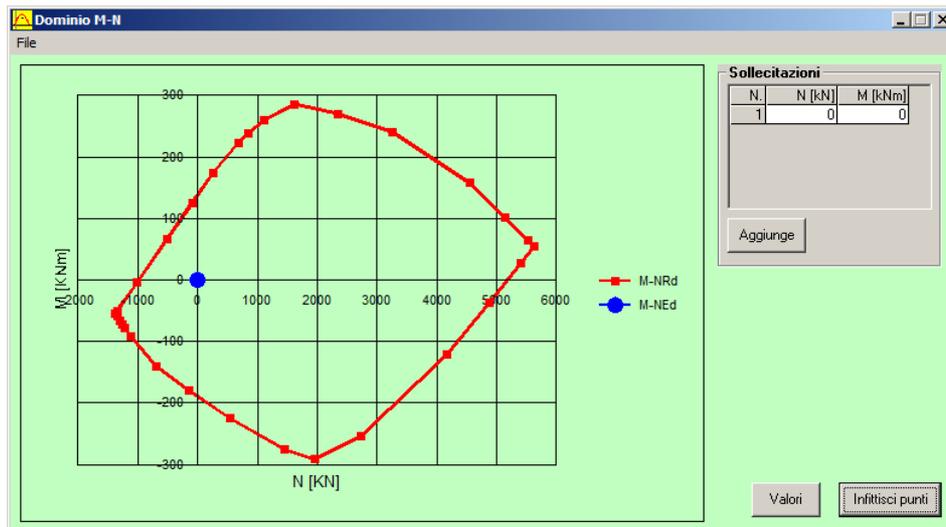
$\epsilon_c$  ‰

$\epsilon_s$  ‰

d  cm

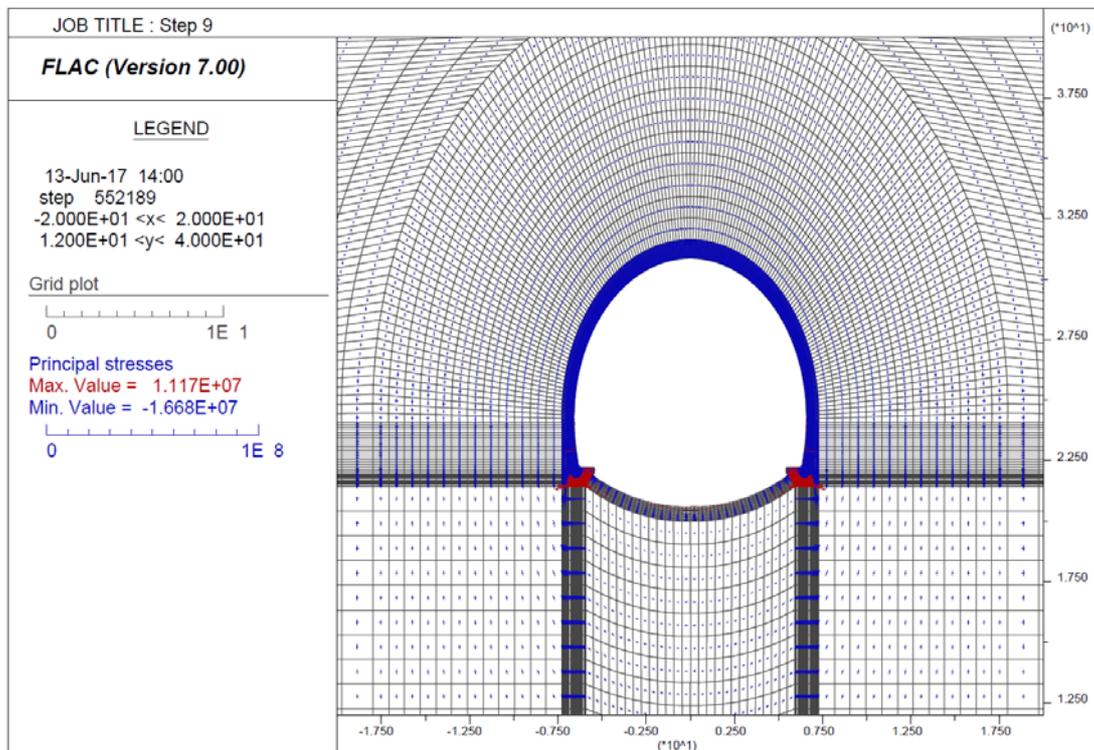
x  x/d

$\delta$



### 3.3.1.1.2 Rivestimento definitivo

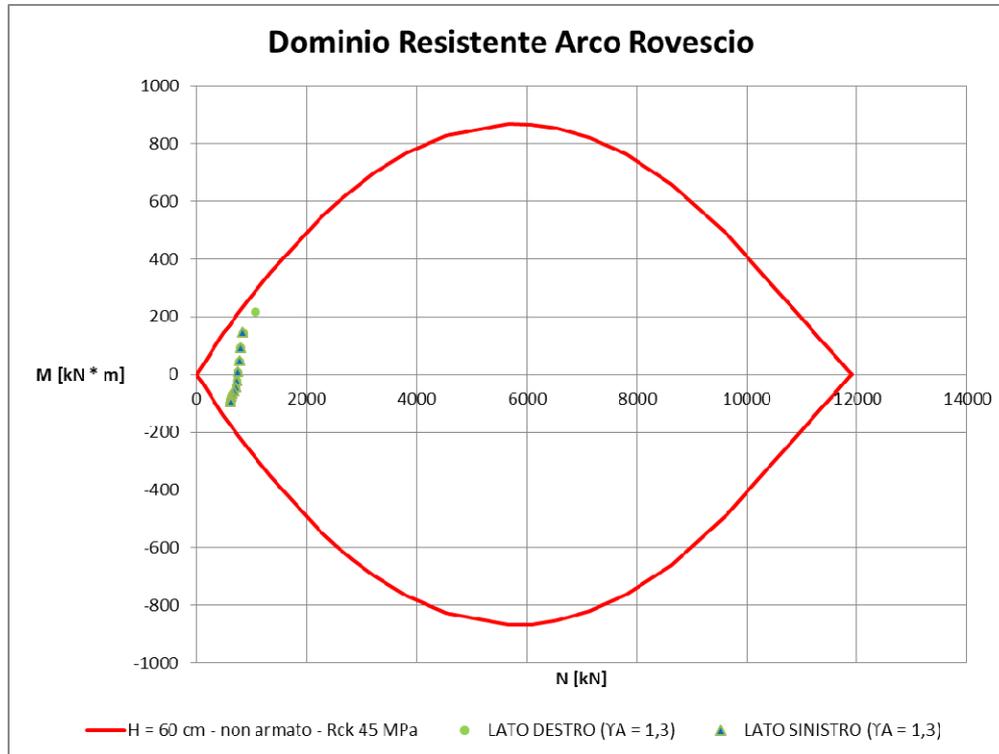
Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase). La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



## Arco rovescio - H = 60 cm

### Verifica SLU

#### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Stato limite di fessurazione

#### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	619	72
<i>Muretta dx</i>	621	71
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	472	-72

Verifica C.A. S.L.U. - File: Arco\_60\_rck45

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 619 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 72 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm²	$f_{cd}$	19.83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13.5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm²	$\tau_{co}$	0.8
		$\tau_{c1}$	2.257

$\sigma_c$  -2.247 N/mm²  
 $\sigma_s$  -0.06422 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0 ‰  
 d 55 cm  
 x 55.11 x/d 1.002  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 3

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Arco\_60\_rck45

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 621 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 71 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm²	$f_{cd}$	19.83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13.5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm²	$\tau_{co}$	0.8
		$\tau_{c1}$	2.257

$\sigma_c$  -2.23 N/mm²  
 $\sigma_s$  -0.4206 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0.002103 ‰  
 d 55 cm  
 x 55.7 x/d 1.013  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 3

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Arco\_60\_rck45

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub>  472 kN  
M<sub>xEd</sub>  -72 kNm  
M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391,3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3,5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	19,83
$E_s / E_c$	15	$f_{cc} / f_{cd}$	0,8
$\epsilon_{syd}$	1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13,5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0,8
		$\tau_{c1}$	2,257

$\sigma_c$  -2,134 N/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_s$  7,788 N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_s$  0,03894 ‰  
d 55 cm  
x 44,24 x/d 0,8043  
 $\delta$  1

Verifica  
N° iterazioni:

Precompresso

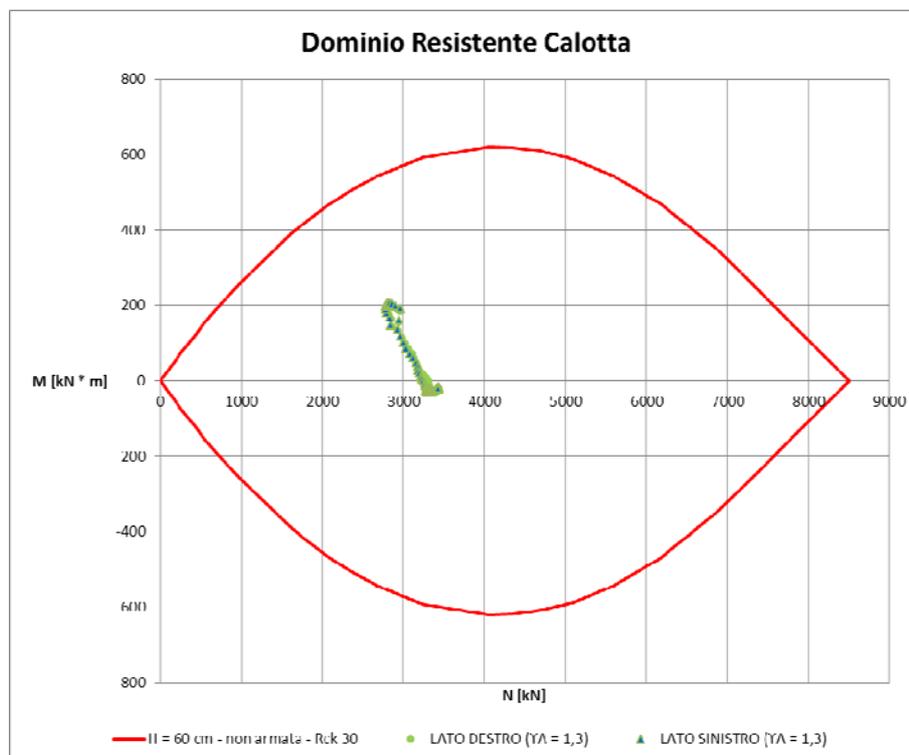
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione di mezzeria dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 600 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 545 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 545 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 55 [mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{f,1}$ = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{f,1}$ = 1 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,1}$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{f,2}$ = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{f,2}$ = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,2}$ = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	$f_{ck}$ = 35 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	$f_{ctm}$ = 3,2 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	$E_{cm}$ = 34077 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$ = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	$E_s$ = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	$\sigma_s$ = 7,78 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 442,4 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	$\alpha_e$ = 5,87 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	$A_s$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	$A_{c,eff,1}$ = 137500 [mm <sup>2</sup> ]
	$A_{c,eff,2}$ = 52533 [mm <sup>2</sup> ]
	$A_{c,eff,3}$ = 300000 [mm <sup>2</sup> ]
	$A_{c,eff,min}$ = 52533 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	$\rho_{p,eff}$ = 0,00006 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	$f_{ct,eff}$ = 3,2 [MPa]
Fattore di durata del carico	$k_f$ = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{min}$ = 0,000023 [-]
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{calc.}$ = -0,107352 [-]
	<b><math>[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]</math> = 0,000023 [-]</b>
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	$\phi_{eq}$ = 1,00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	$s_{max,ref}$ = 277,5 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	$k_1$ = 0,800 [-]
	$k_2$ = 0,500 [-]
	$k_3$ = 3,400 [-]
	$k_4$ = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	$s_{r,max,1}$ = 3030 [mm]
	$s_{r,max,2}$ = 205 [mm]
	<b><math>s_{r,max}</math> = 3030 [mm]</b>
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	$w_{k,lim}$ = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b><math>w_k</math> = 0,07 [mm]</b>

## Calotta – H = 60 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Rene sx</i>	2529	-18
<i>Rene dx</i>	2532	-18
<i>Chiave</i>	2633	-16

Verifica C.A. S.L.U. - File: cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  2529 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -18 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C25/30
$\epsilon_{su}$ 67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391.3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3.5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 14.17
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0.8 ?
$\epsilon_{syd}$ 1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 9.75
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²	$\tau_{co}$ 0.6
	$\tau_{c1}$ 1.829

$\sigma_c$  -4.515 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0.2974 ‰

Verifica N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  2532 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -18 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C25/30
$\epsilon_{su}$ 67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391.3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3.5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 14.17
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0.8 ?
$\epsilon_{syd}$ 1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 9.75
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²	$\tau_{co}$ 0.6
	$\tau_{c1}$ 1.829

$\sigma_c$  -4.52 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0.2978 ‰

Verifica N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  2633 kN  
 M<sub>Ed</sub>  -16 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN  yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C25/30	
E <sub>su</sub>	67.5 ‰	E <sub>c2</sub>	2 ‰
f <sub>yd</sub>	391.3 N/mm²	E <sub>cu</sub>	3.5 ‰
E <sub>s</sub>	200.000 N/mm²	f <sub>cd</sub>	14.17
E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>	15	f <sub>cc</sub> /f <sub>cd</sub>	0.8
ε <sub>syd</sub>	1.957 ‰	σ <sub>c,adm</sub>	9.75
σ <sub>s,adm</sub>	255 N/mm²	τ <sub>co</sub>	0.6
		τ <sub>c1</sub>	1.829

σ<sub>c</sub> -4.655 N/mm²  
 ε<sub>s</sub> -0.3125 ‰

Verifica  
 N° iterazioni:

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

### 3.4 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	250
	$\varphi'$	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	200	200
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B2.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una condizione di copertura pari a 50 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

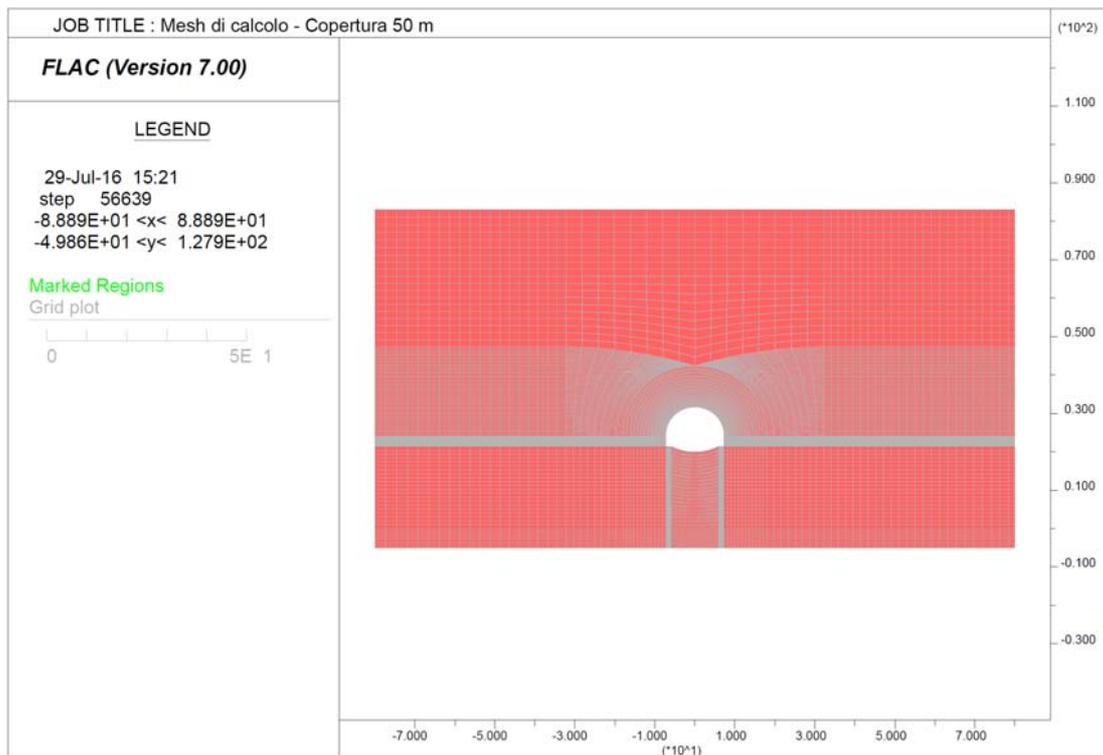
Il prerivestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

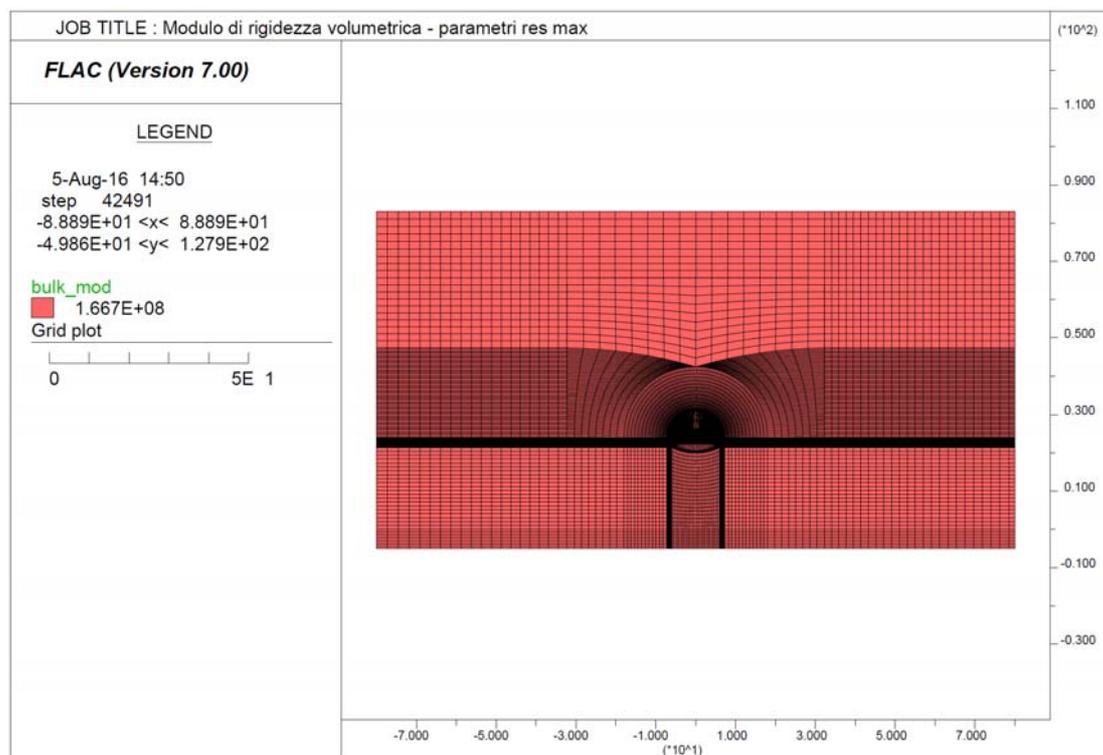
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

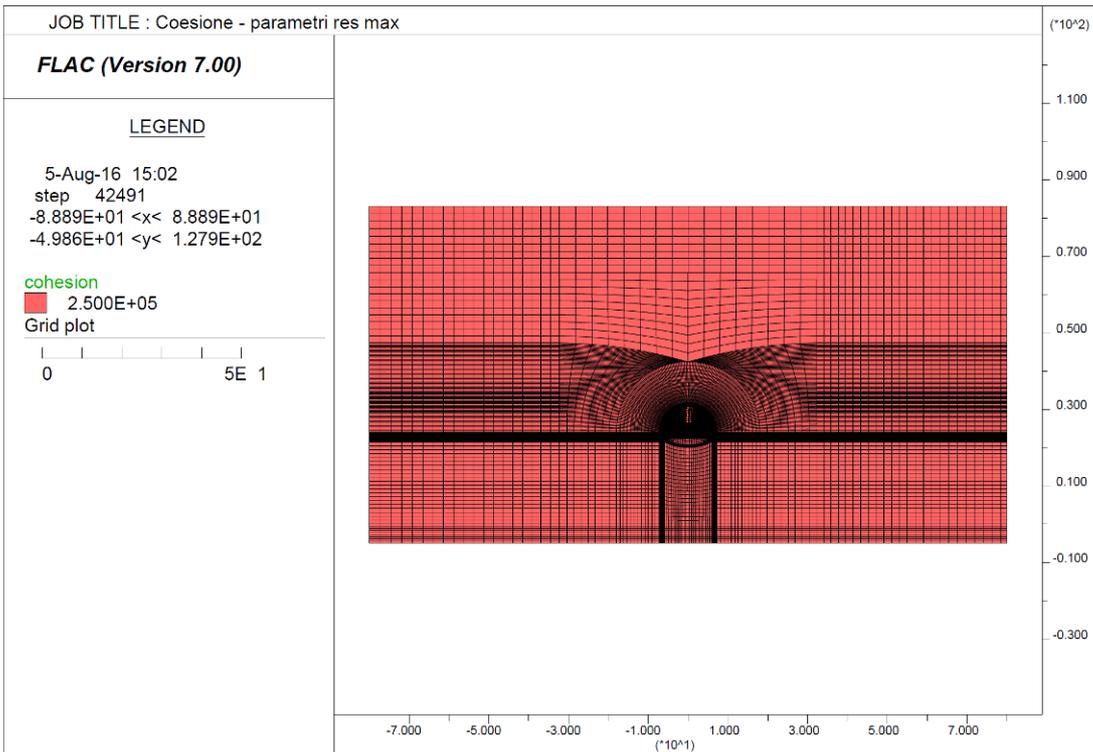
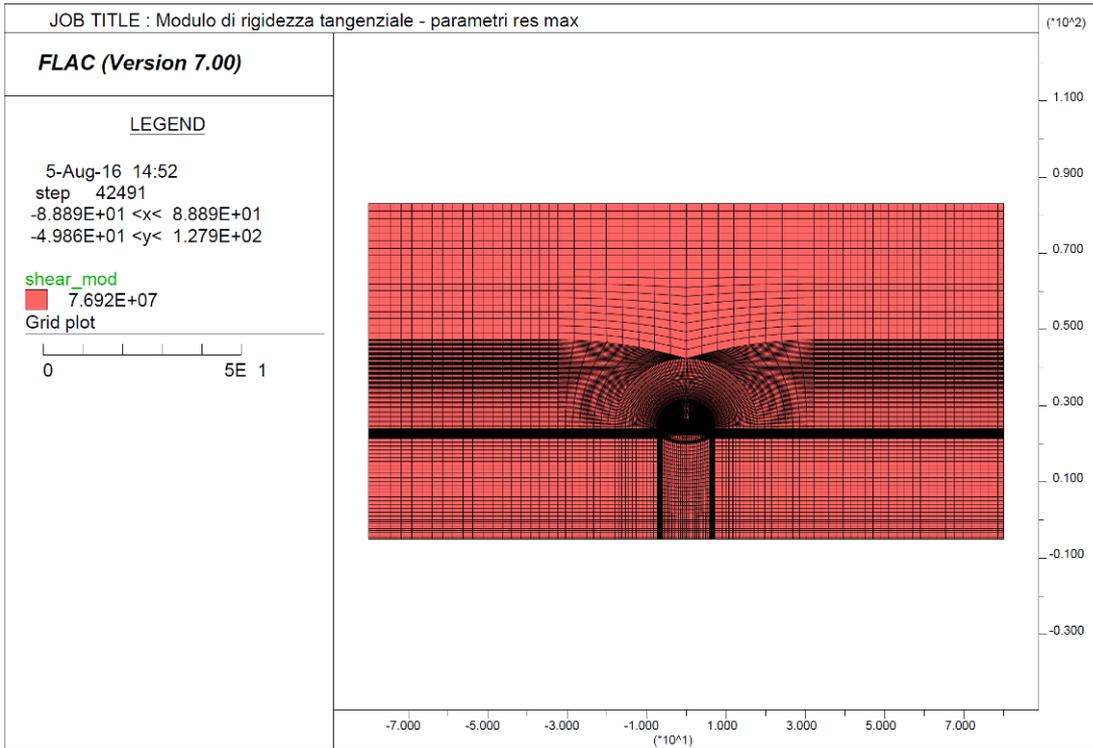
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

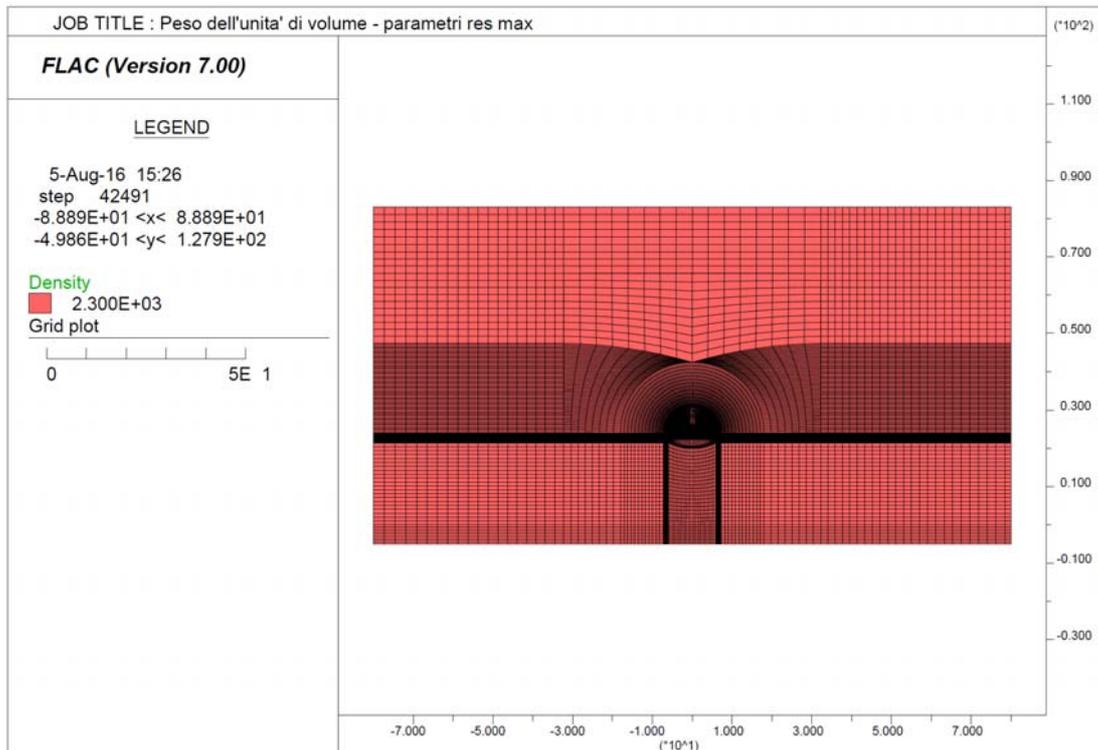
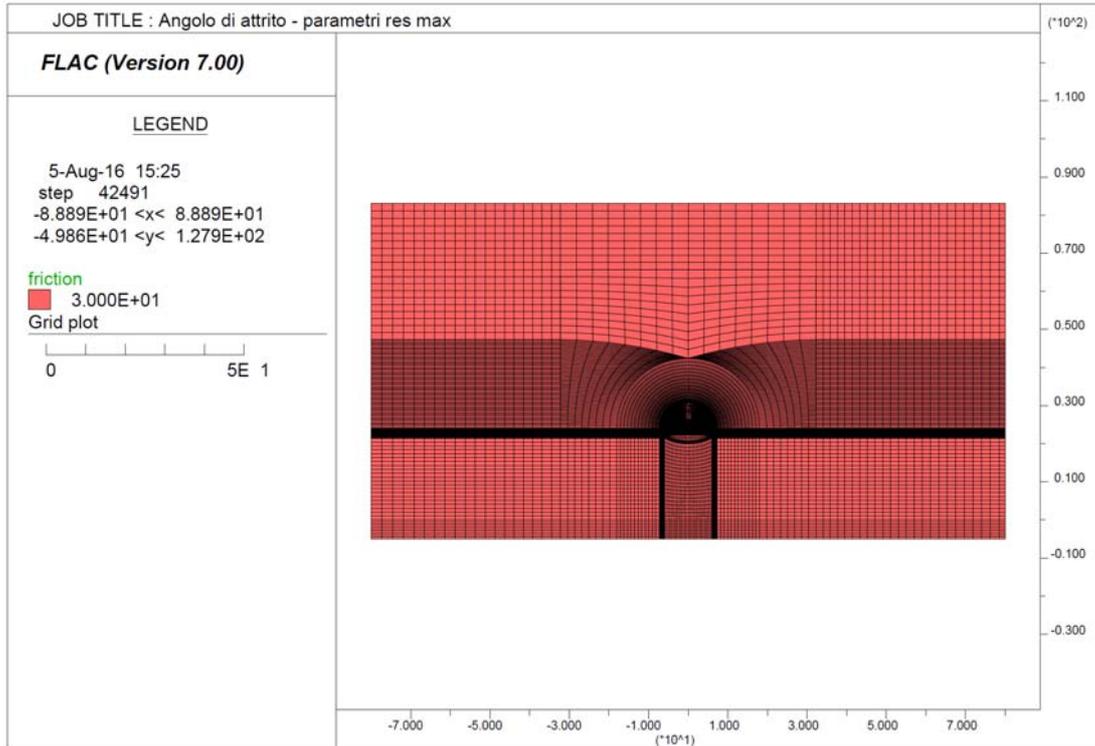
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

Sezione tipo B2 - parametri res max - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	70,0%	1,83	-
Step 3	Scavo	1	74,1%	0,26*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	74,1%	0,26*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	90,4%	0,85*	0,59
Step 6	Avanzamento 2 D ( E SB = 31 Gpa)	29	96,4%	1,13*	0,87
Step 7	Getto arco rovescio e muretta a 2D e avanzamento fino a deformazioni esaurite	-	100,0%	-	0,87
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	0,87
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	0,87

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

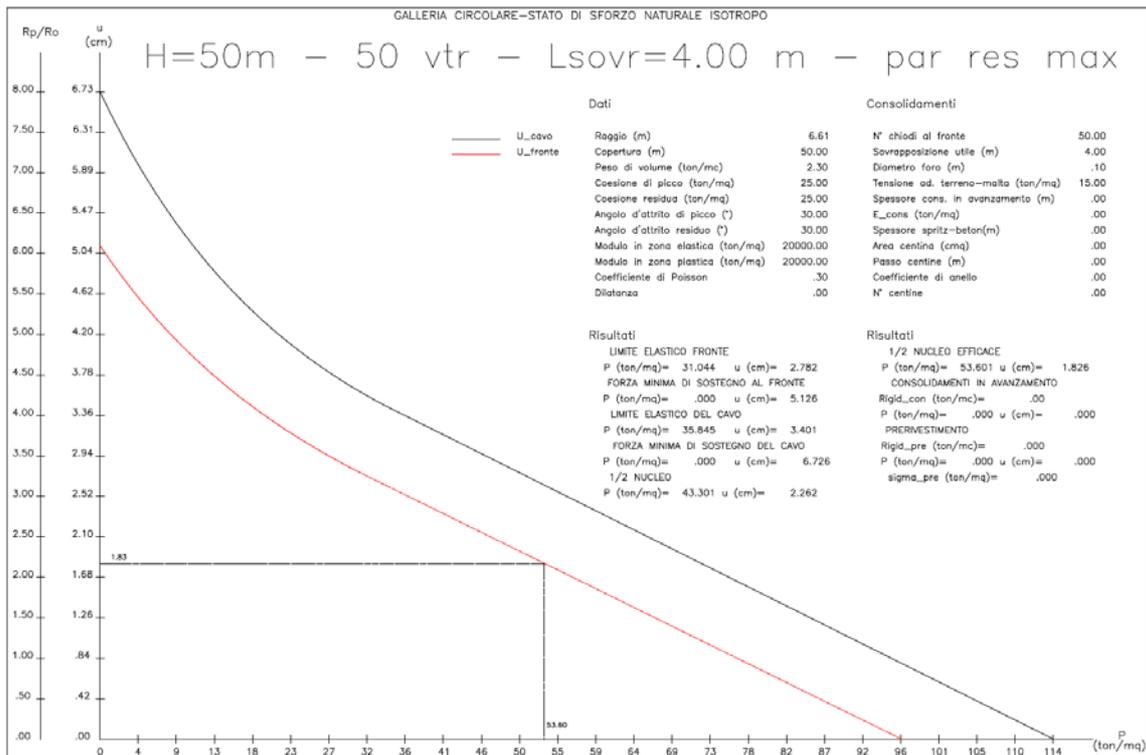
### 3.4.1 Fasi di calcolo

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il pririvestimento e per il rivestimento definitivo.

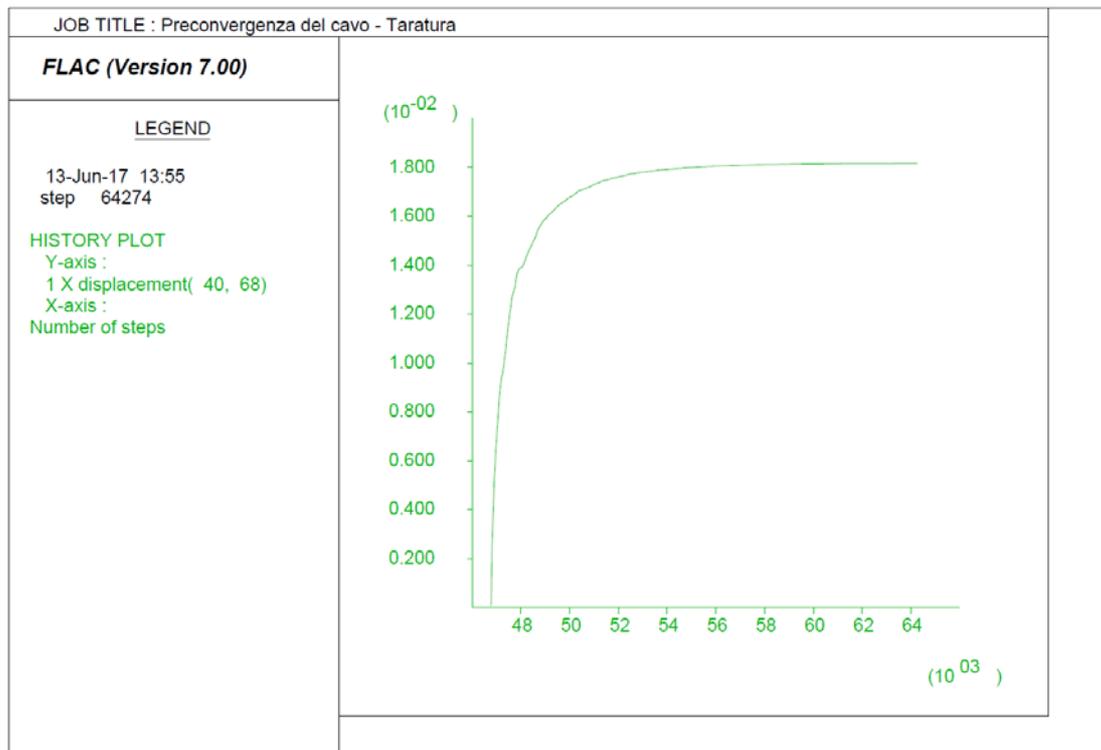
Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

Fase 1 In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

Fase 2 Questa fase, generalmente indicata come fase di taratura del modello, consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo. Il contributo statico fornito dalla porzione di ammasso oltre il fronte non ancora scavato viene simulato rilasciando il 70% delle forze di scavo. Tale valore è stato tarato sulla base delle indicazioni fornite dalle curve caratteristiche che, per il caso in analisi, indica una preconvergenza massima di circa 1.83 cm così come evidente dalla curva caratteristica riportata sotto.



L'output del programma di calcolo FLAC riporta lo spostamento del cavo in corrispondenza di questo step di calcolo sul piedritto sx del modello.



Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.741)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 180 / 100) con spritz beton (20 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.741)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a  $\frac{1}{2}$  D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton ( $E = 10$  GPa) (fattore di rilascio = 0.904)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino a 2 D (fattore di rilascio = 0.964).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1.00)

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

#### *3.4.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti*

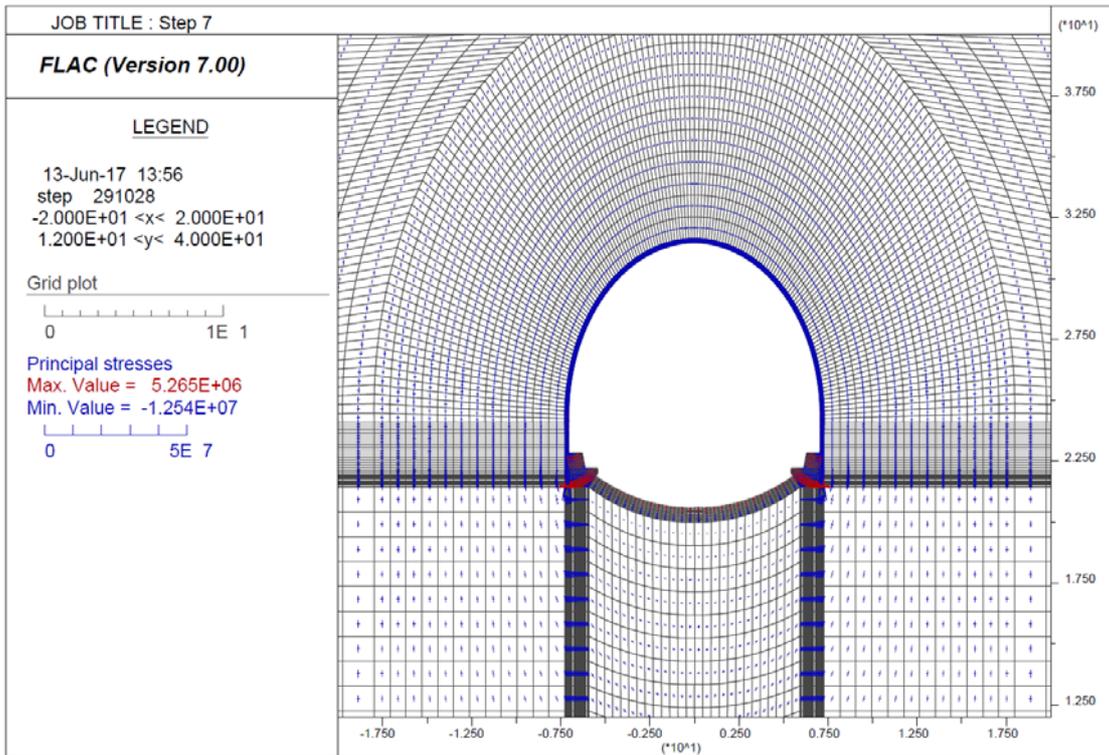
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

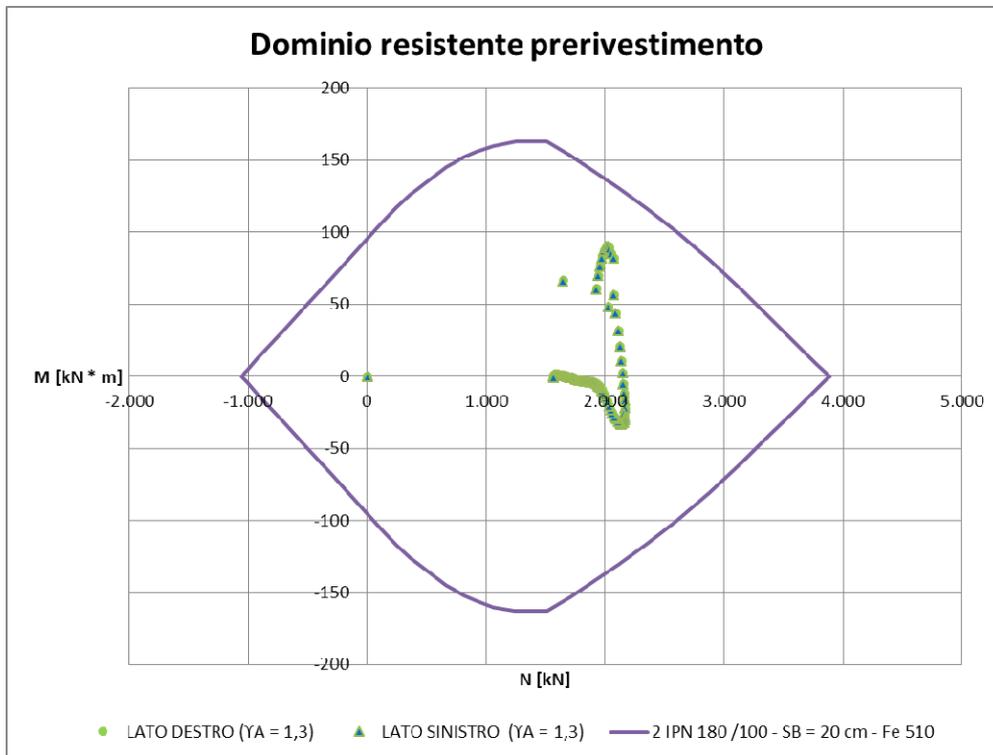
##### *3.4.1.1.1 Rivestimento di prima fase*

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 180 / 100 – SB = 20 cm).



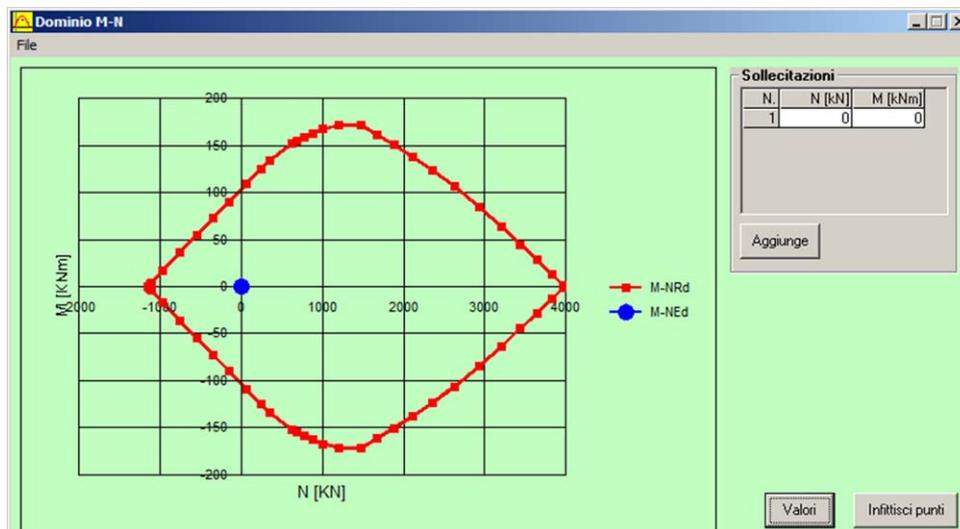
Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. It includes a menu bar (File, Materiali, Opzioni, Visualizza, Progetto Sez. Rett., Sismica, Normativa: NTC 2008), a title bar, and several input panels. The 'Tipo Sezione' panel has radio buttons for 'Rettan.re', 'Trapezi', 'a T', 'Circolare', 'Rettangoli', and 'Coord.'. The 'Sollecitazioni' panel shows 'S.L.U.' selected and 'Metodo n' as the calculation method. The 'P.to applicazione N' panel has 'Centro' selected. The 'Materiali' panel shows 'Fe510' and 'C25/30' with various material properties. The 'Tipo rottura' panel has 'Lato calcestruzzo - Acciaio snervato' selected. The 'Tipo flessione' panel has 'Retta' selected. The 'Calcola MRd' and 'Dominio M-N' buttons are visible. The 'Precompresso' checkbox is unchecked.

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	20	1	17,056	1
			2	17,056	19

Material	Property	Value	
Fe510	$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	
	$f_{yd}$	338.1 N/mm²	
	$E_s$	200.000 N/mm²	
	$E_s/E_c$	15	
	$\epsilon_{syd}$	1.691 ‰	
	$\sigma_{s,adm}$	240 N/mm²	
	C25/30	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
		$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
		$f_{cd}$	14.17 N/mm²
		$f_{cc}/f_{cd}$	0.8

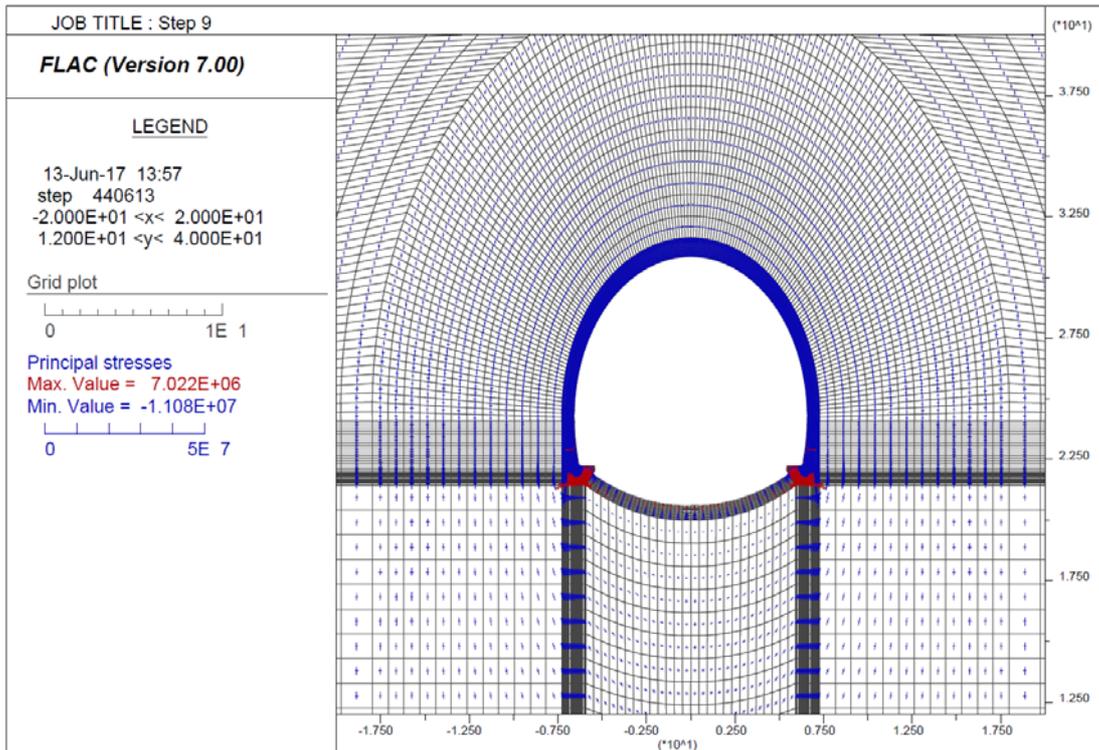
Parameter	Value
$M_{xRd}$	104.4 kNm
$\sigma_c$	-14.17 N/mm²
$\epsilon_c$	3.5 ‰
$\epsilon_s$	40.55 ‰
d	19 cm
x	1.51
x/d	0.07945
$\delta$	0.7



### 3.4.1.1.2 Rivestimento definitivo

Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase).

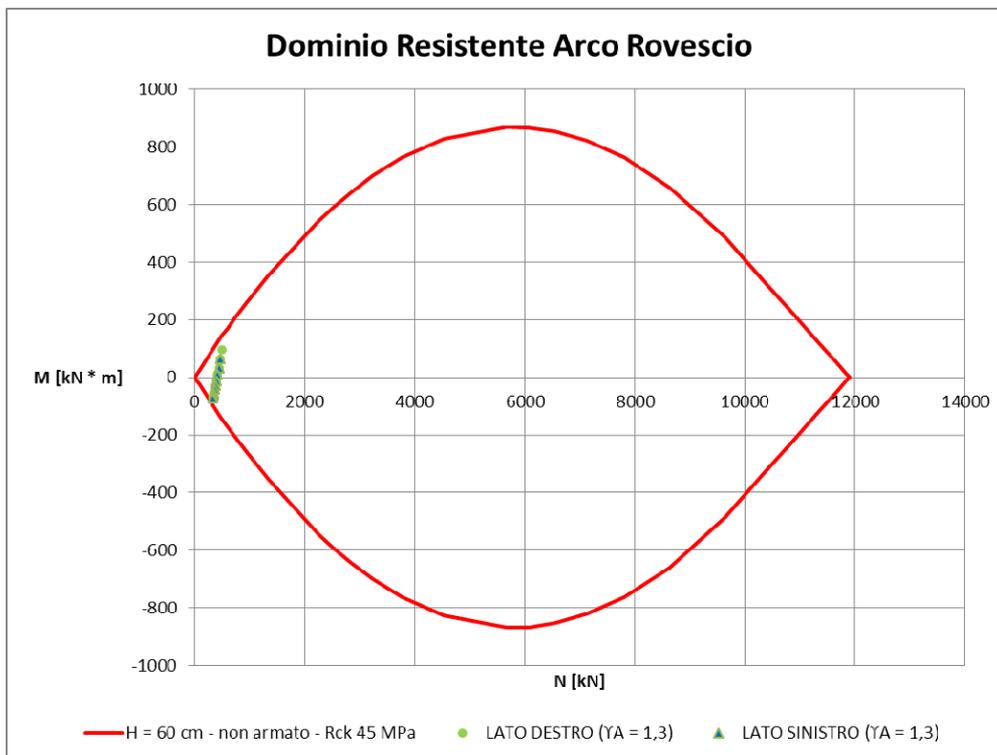
La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



**Arco rovescio - H = 60 cm**

**Verifica SLU**

**Momento flettente**



## **Verifica SLE**

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punte tensionali
- Stato limite di fessurazione

### ***Verifica nei confronti delle Punte tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	361	49
<i>Muretta dx</i>	361	48
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	252	-56

Verifica C.A. S.L.U. - File: Arco\_60\_rck45

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 361 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 49 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19.83  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13.5  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.8  
 $\tau_{c1}$  2.257

$\sigma_c$  -1.465 N/mm²  
 $\sigma_s$  2.551 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.01275 ‰  
 d 55 cm  
 x 49.28 x/d 0.896  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 3

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Arco\_60\_rck45

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 361 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 48 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19.83  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13.5  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.8  
 $\tau_{c1}$  2.257

$\sigma_c$  -1.441 N/mm²  
 $\sigma_s$  2.109 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.01054 ‰  
 d 55 cm  
 x 50.11 x/d 0.9111  
 $\delta$  1

Verifica N° iterazioni: 3

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Arco\_60\_rck45

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 252 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -56 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	19.83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13.5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0.8
		$\tau_{c1}$	2.257

$\sigma_c$  -2.16 N/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_s$  43.97 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_s$  0.2199 ‰  
 d 55 cm  
 x 23.33 w/d 0.4242  
 $\delta$  0.9703

Verifica N° iterazioni: 6

Precompresso

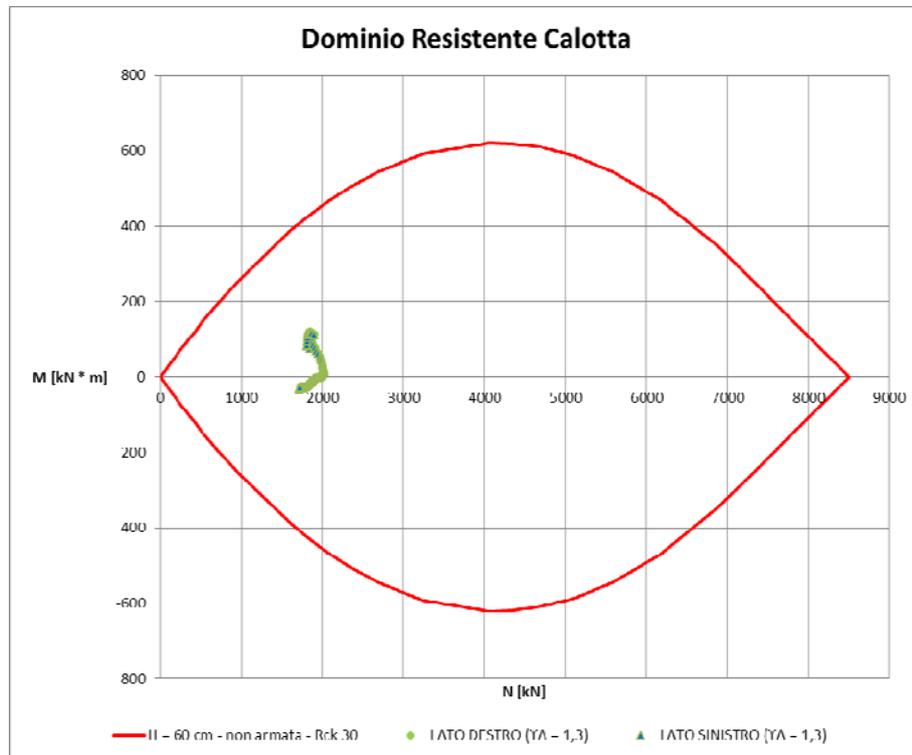
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione della mezzeria dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 600 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 545 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 545 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 47 [mm]
<a href="#">Armatura tesa ordinaria</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{r,1}$ = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{r,1}$ = 1 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,1}$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
<a href="#">Armatura tesa di infittimento</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{r,2}$ = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{r,2}$ = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,2}$ = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	$f_{ck}$ = 35 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	$f_{ctm}$ = 3,2 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	$E_{cm}$ = 34077 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$ = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	$E_s$ = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	$\sigma_s$ = 43,97 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 233,3 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	$\alpha_e$ = 5,87 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	$A_s$ = 3 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	$A_{c,eff,1}$ = 137500 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,2}$ = 122233 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,3}$ = 300000 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff,min}$ = 122233 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	$\rho_{p,eff}$ = 0,00003 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	$f_{ct,eff}$ = 3,2 [MPa]
Fattore di durata del carico	$k_f$ = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{min}$ = 0,000132 [-]
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{calc.}$ = -0,249605 [-]
	<b><math>[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]</math> = 0,000132 [-]</b>
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	$\phi_{eq}$ = 1,00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	$s_{max,rif}$ = 237,5 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	$k_1$ = 0,800 [-] $k_2$ = 0,500 [-] $k_3$ = 3,400 [-] $k_4$ = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	$s_{r,max,1}$ = 6774 [mm]
	$s_{r,max,2}$ = 477 [mm]
	<b><math>s_{r,max}</math> = 477 [mm]</b>
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	$w_{k,lim}$ = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b><math>w_k</math> = 0,06 [mm]</b>

## Calotta – H = 60 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

#### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Rene sx</i>	1473	-1
<i>Rene dx</i>	1470	-2
<i>Chiave</i>	1327	-20

Verifica C.A. S.L.U. - File: cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 1473 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -1 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C25/30  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  14.17 ‰  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8 ?  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  9.75  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.6  
 $\tau_{c1}$  1.829

$\sigma_c$  -2.472 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0.1831 ‰

Verifica N° iterazioni: 0

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5
2	0	55

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 1470 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -2 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C25/30  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  14.17 ‰  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8 ?  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  9.75  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.6  
 $\tau_{c1}$  1.829

$\sigma_c$  -2.483 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0.1817 ‰

Verifica N° iterazioni: 0

Precompresso



### 3.5 Sezione tipo Piazzola B0 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo Piazzola B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	250
	$\varphi'$	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	200	200
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo Piazzola B0 con parametri di resistenza pari ai massimi tra quelli individuati dal range di variabilità.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una condizione di copertura pari a 50 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

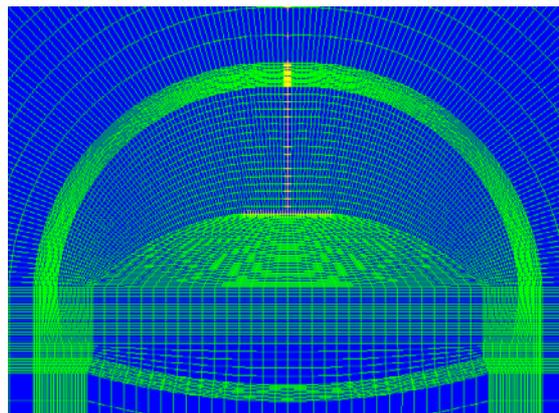
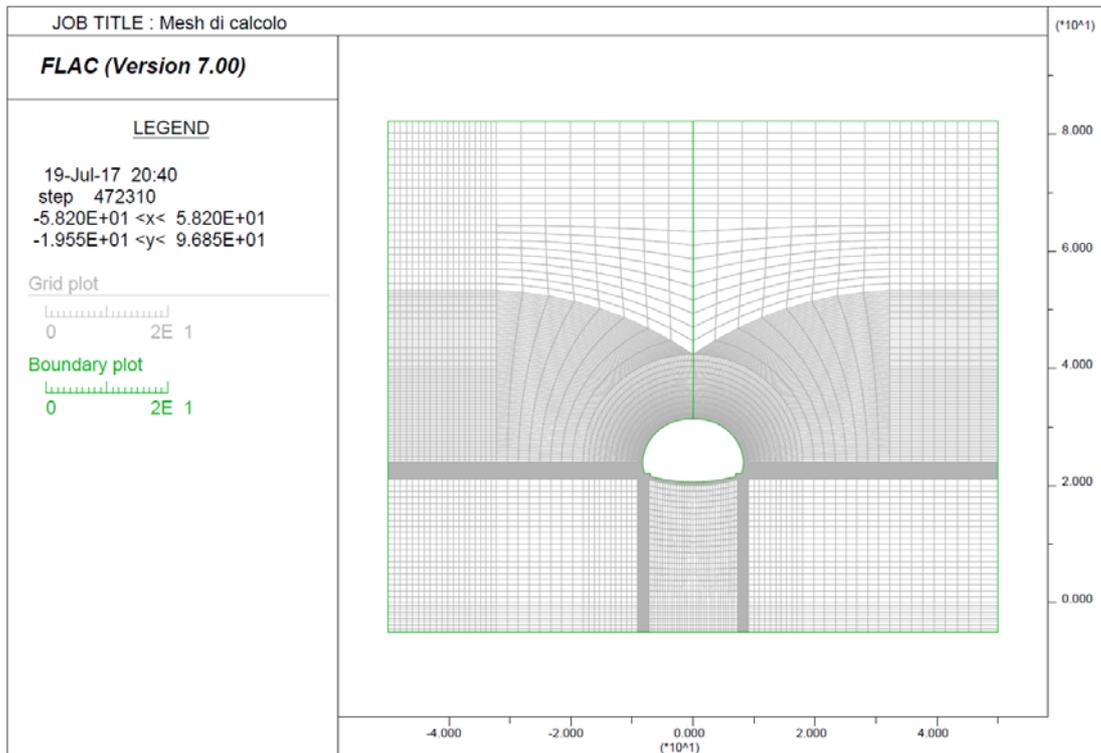
Il prerinvestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

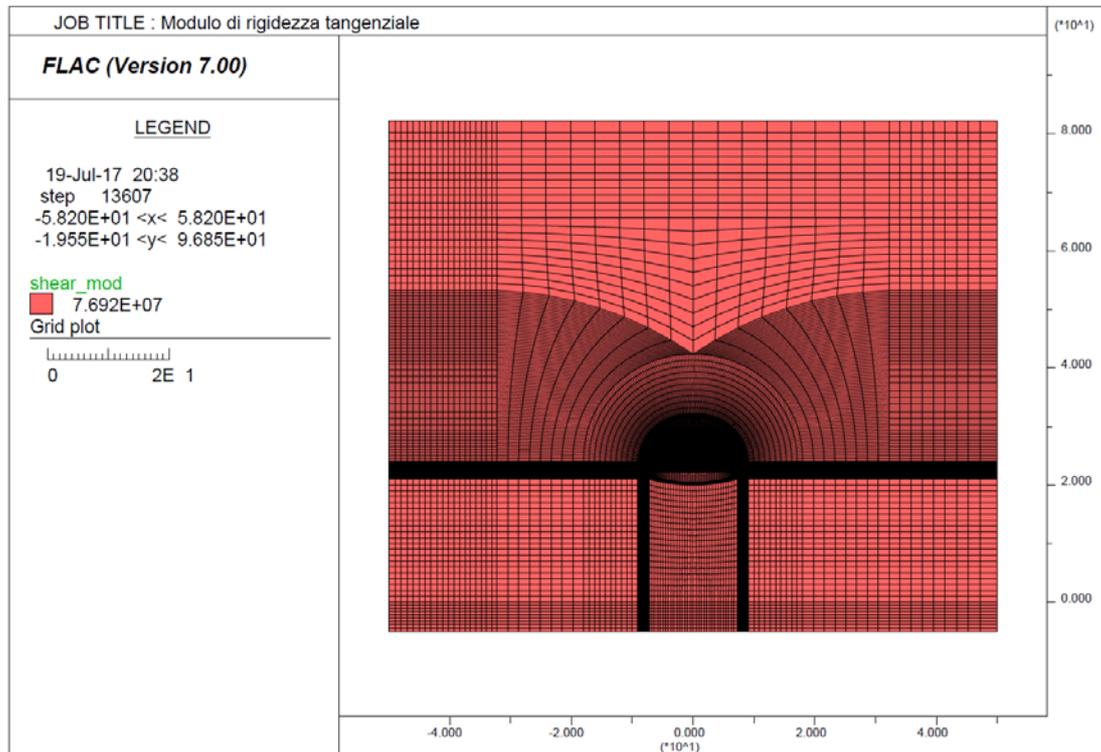
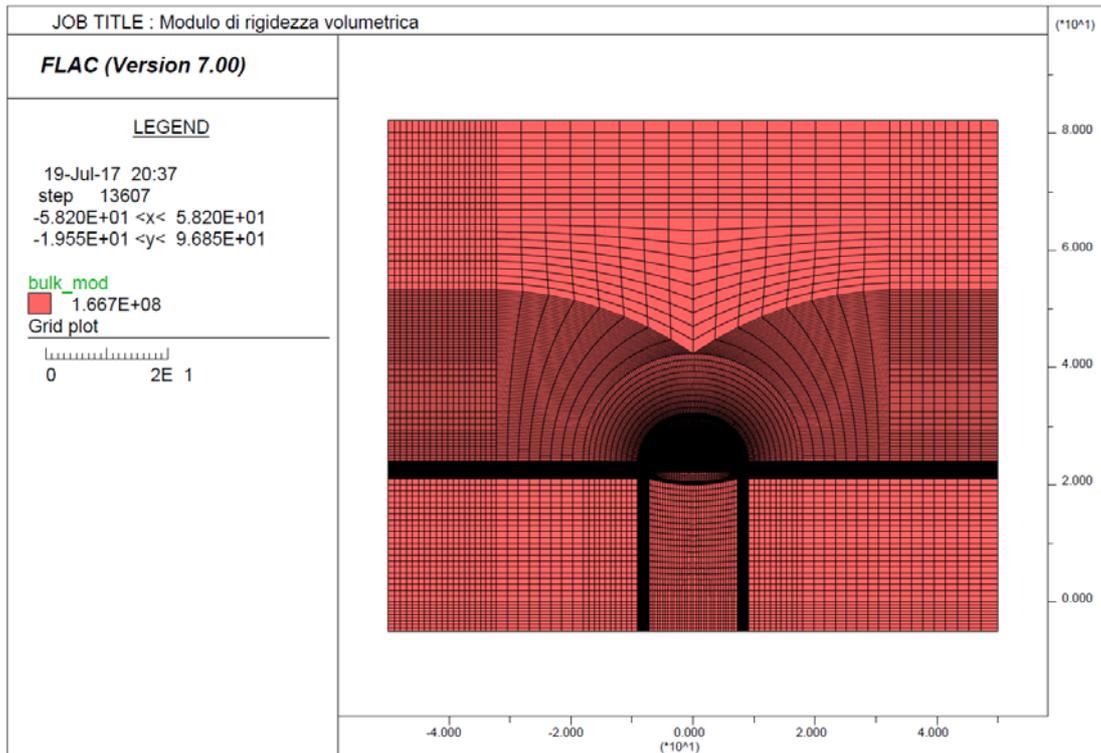
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

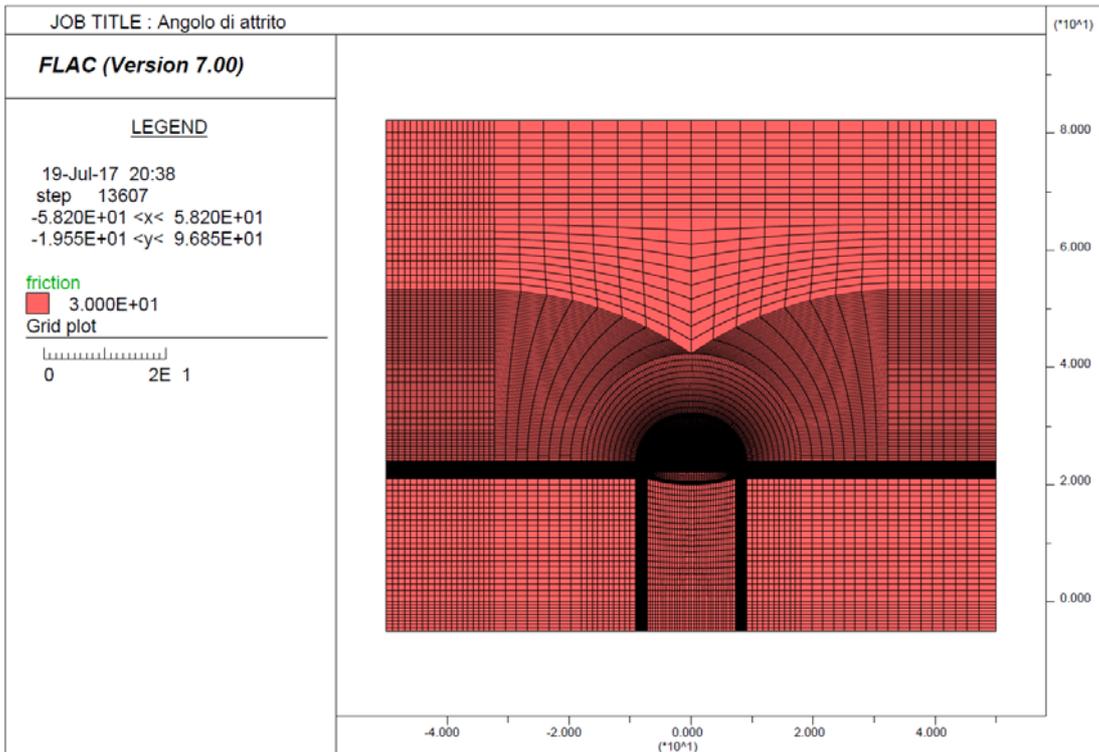
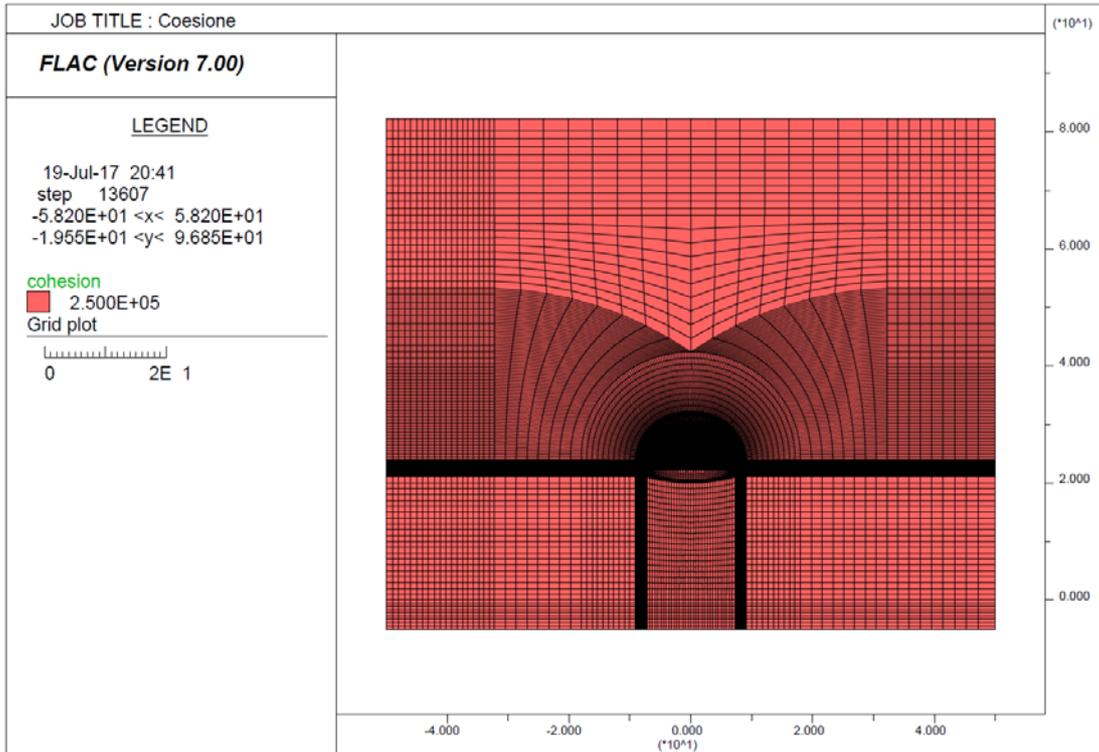
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

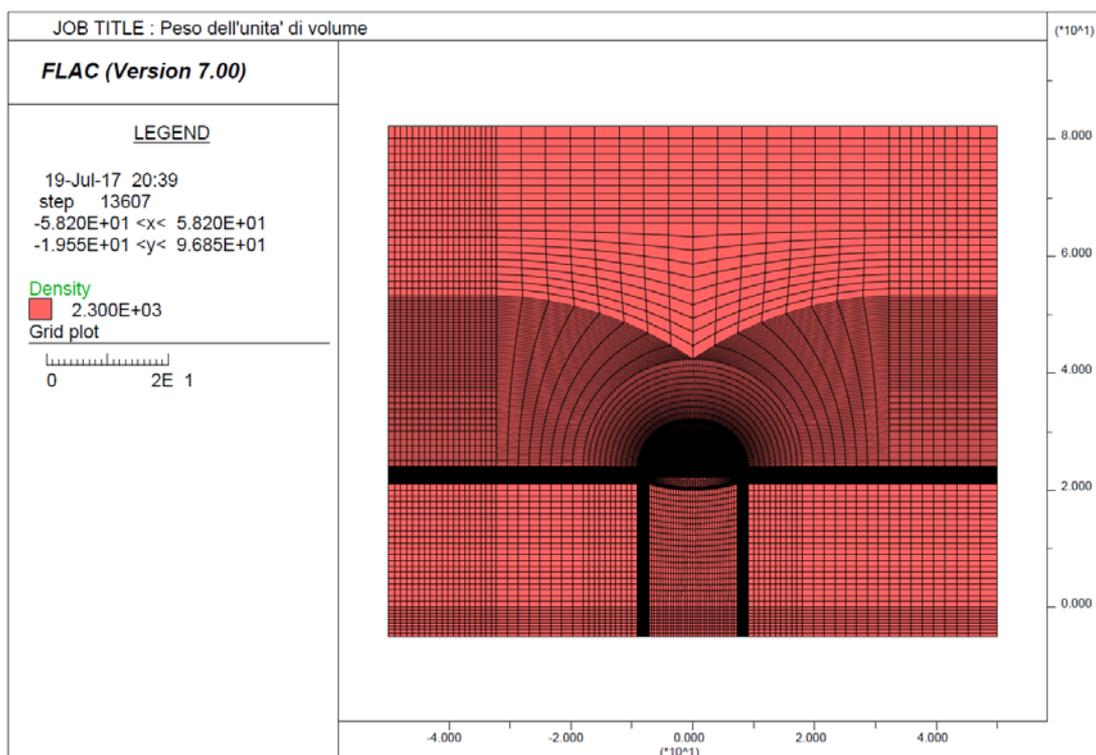
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo Piazzola B0 - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir oriz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir oriz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	78,0%	2,6	-
Step 3	Scavo	1	80,6%	0,27*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	80,6%	0,27*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	93,0%	0,69*	0,42
Step 6	Avanzamento fino a deformazioni esaurite ( E SB = 31 Gpa)	-	100,0%	1,01*	0,74
Step 7	Getto arco rovescio e muretta	-	100,0%	-	0,74
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	0,74
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	0,74

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

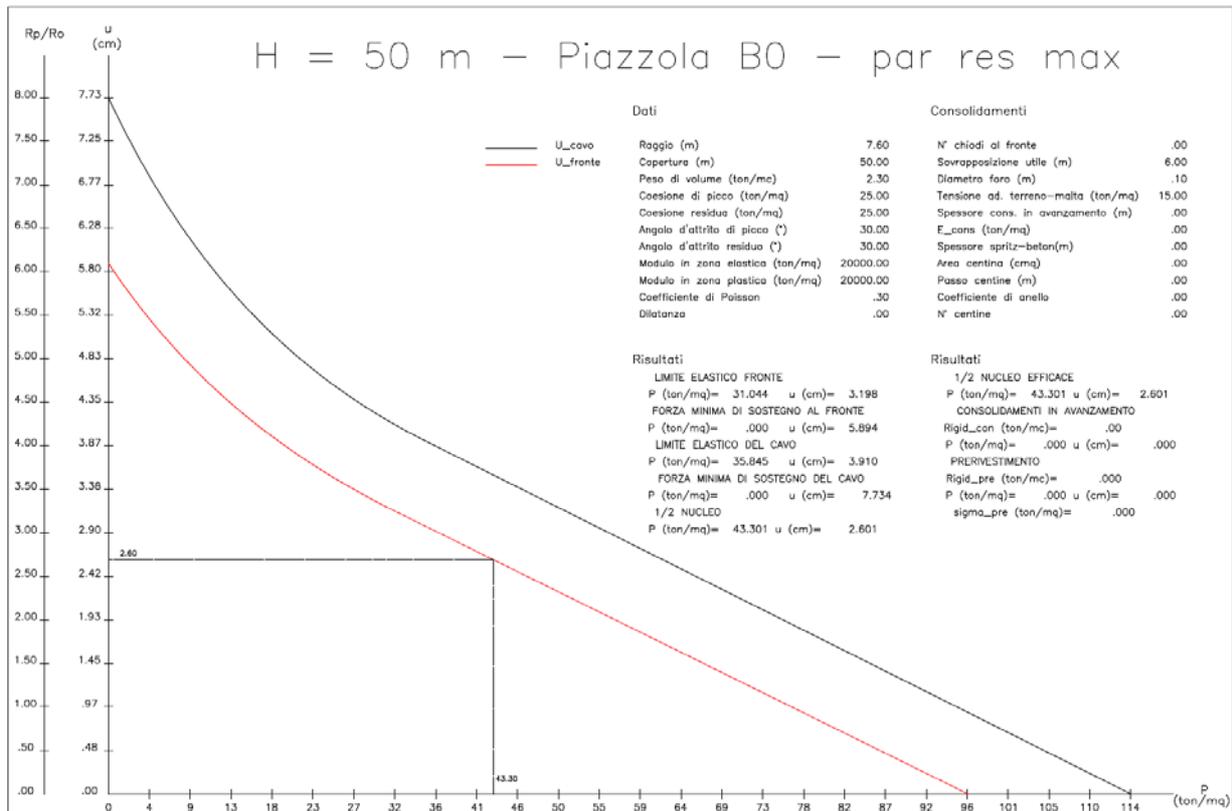
### 3.5.1 Fasi di calcolo

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il priverestimento e per il rivestimento definitivo.

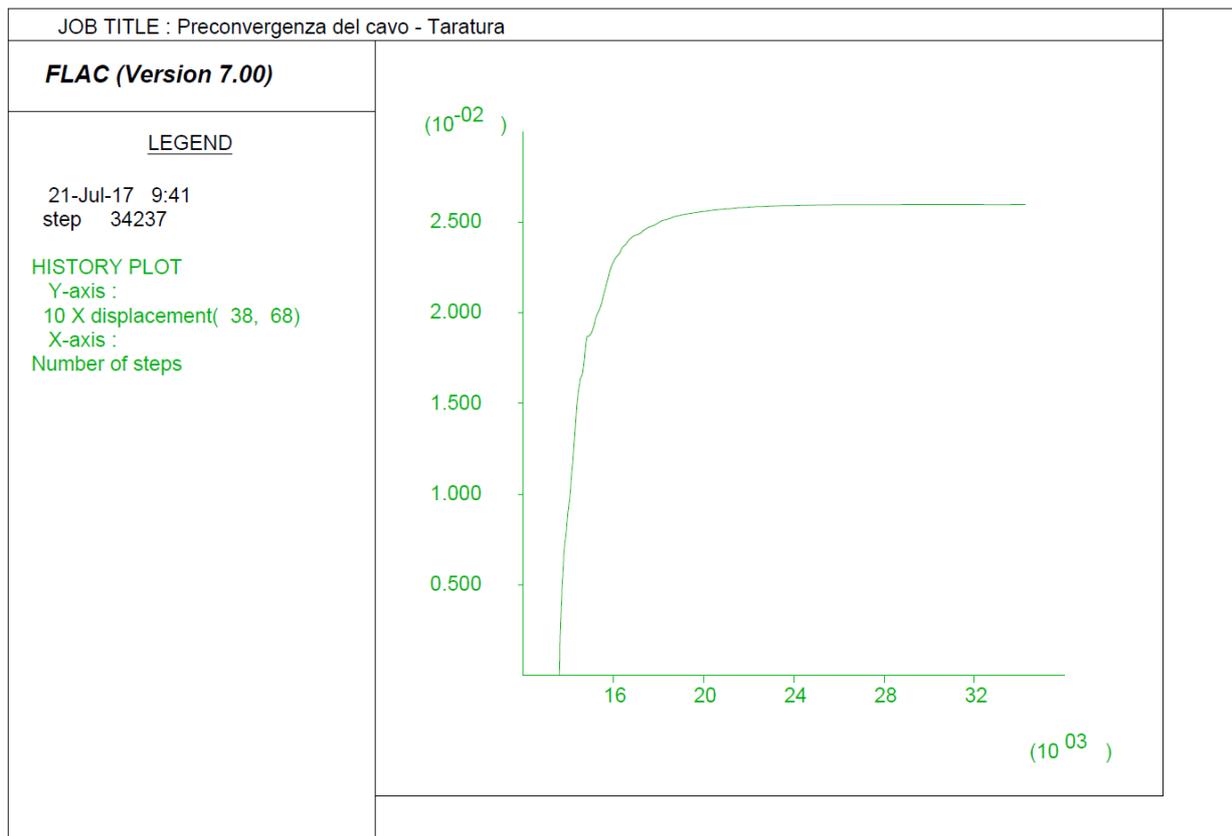
Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

**Fase 1** In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

**Fase 2** Questa fase, generalmente indicata come fase di taratura del modello, consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo. Il contributo statico fornito dalla porzione di ammasso oltre il fronte non ancora scavato viene simulato rilasciando il 78% delle forze di scavo. Tale valore è stato tarato sulla base delle indicazioni fornite dalle curve caratteristiche che, per il caso in analisi, indica una preconvergenza massima di circa 2.6 cm così come evidente dalla curva caratteristica riportata sotto.



L'output del programma di calcolo FLAC riporta lo spostamento del cavo in corrispondenza di questo step di calcolo sul piedritto sx del modello.



Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.10 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.806)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 220 / 100) con spritz beton (25 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.806)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a  $\frac{1}{2}$  D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton ( $E = 10$  GPa) (fattore di rilascio = 0.930)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

### 3.5.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti

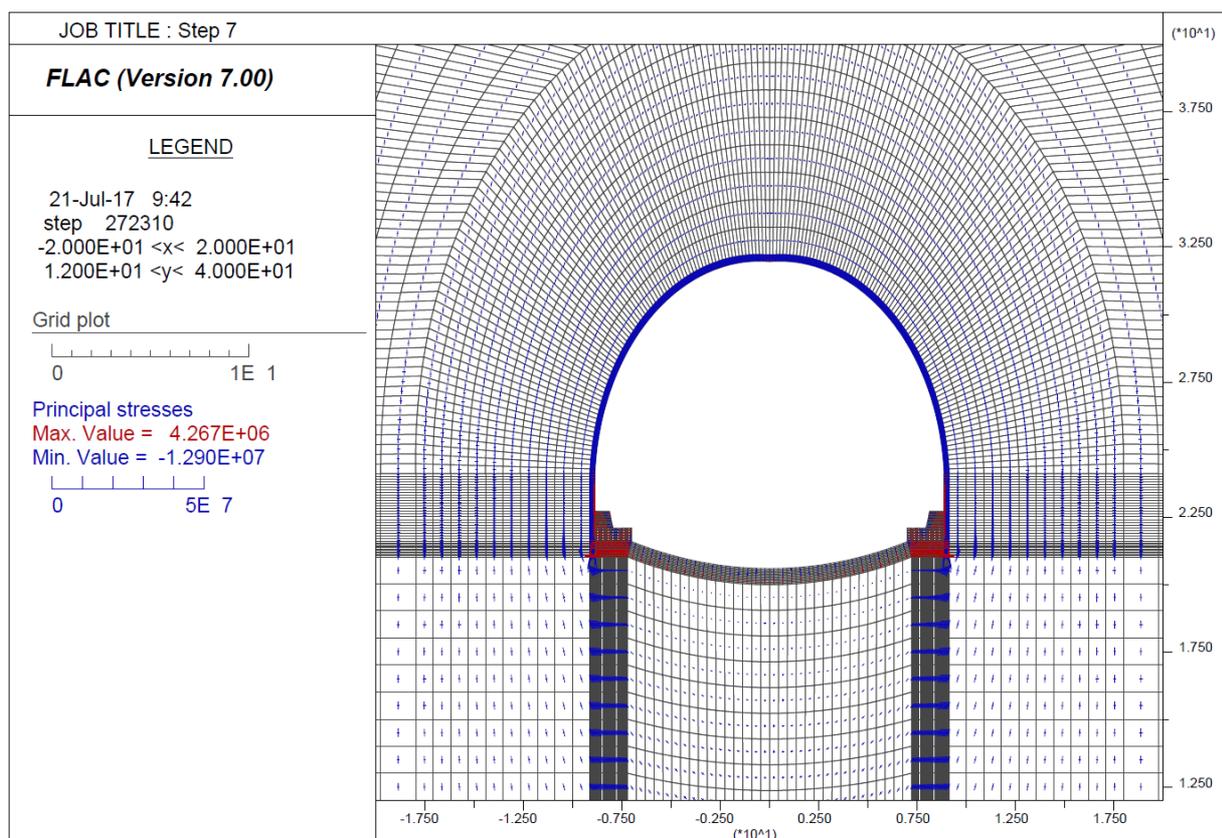
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

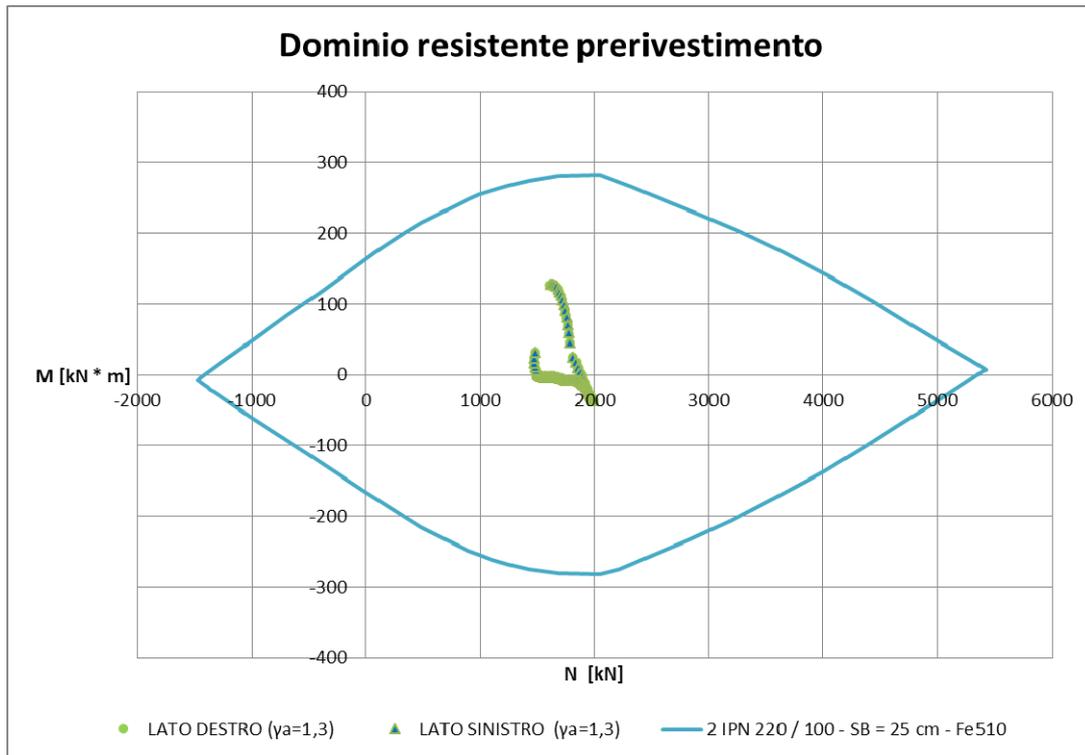
#### 3.5.1.1.1 Rivestimento di prima fase

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 220 / 100 – SB = 25 cm).



Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

**Verifica C.A. S.L.U. - File:**

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	25	1	23,912	1
			2	23,912	23

**Sollecitazioni**

S.L.U.    Metodo n

N<sub>Ed</sub>     1683 kN

M<sub>xEd</sub>     -42 kNm

M<sub>yEd</sub>     0

**P.to applicazione N**

Centro     Baricentro cls

Coord.[cm]    xN     yN

**Tipo rottura**

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

**Metodo di calcolo**

S.L.U.+     S.L.U.-

Metodo n

**Tipo flessione**

Retta     Deviata

N° rett.

Calcola MRd    Dominio M-N

L<sub>0</sub>  cm    Col. modello

Precompresso

**Materiali**

Fe510		C25/30	
$\epsilon_{su}$	67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	338,1 N/mm²	$\epsilon_{cu}$	3,5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm²	$f_{cd}$	14,17
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0,8
$\epsilon_{syd}$	1,691 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9,75
$\sigma_{s,adm}$	240 N/mm²	$\tau_{co}$	0,6
		$\tau_{c1}$	1,829

M<sub>xRd</sub>  kN m

$\sigma_c$   N/mm²

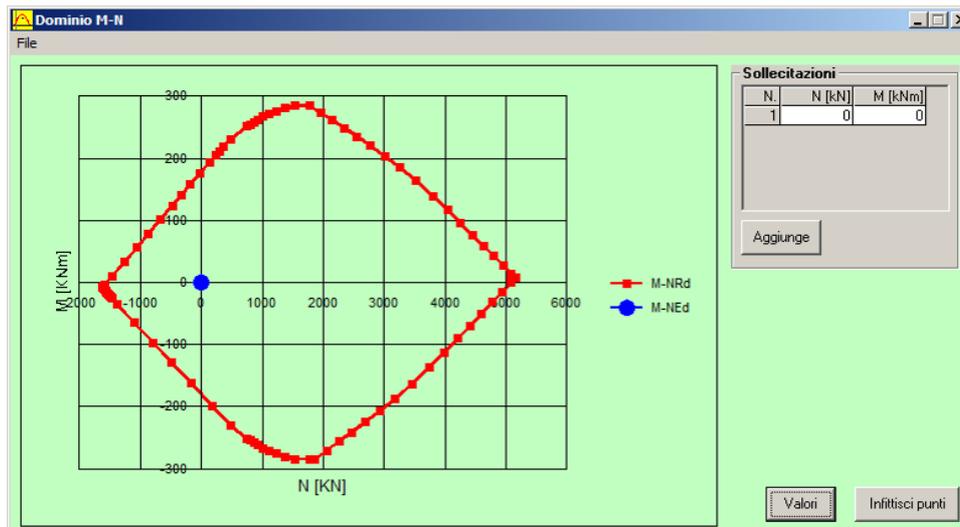
$\epsilon_c$  3,5 ‰

$\epsilon_s$  46,95 ‰

d 23 cm

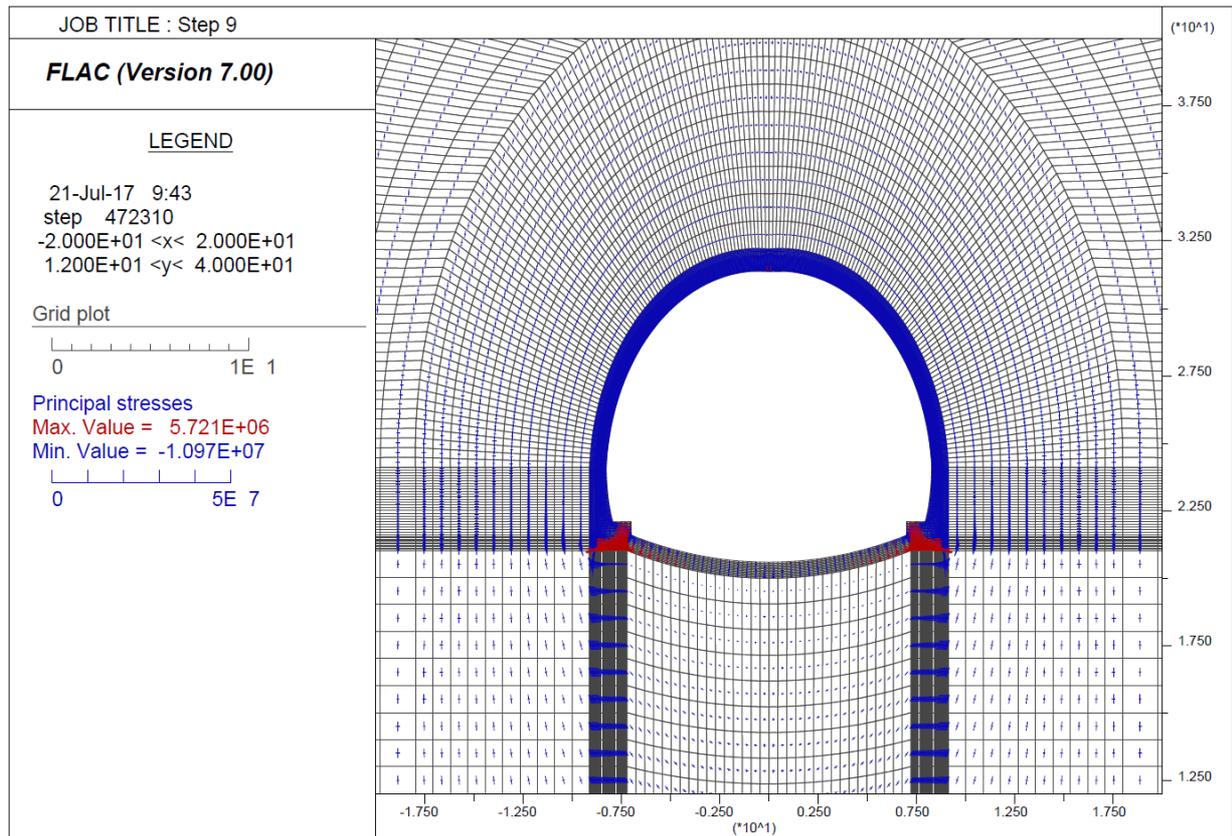
x 1,596    x/d 0,06937

$\delta$  0,7



### 3.5.1.1.2 Rivestimento definitivo

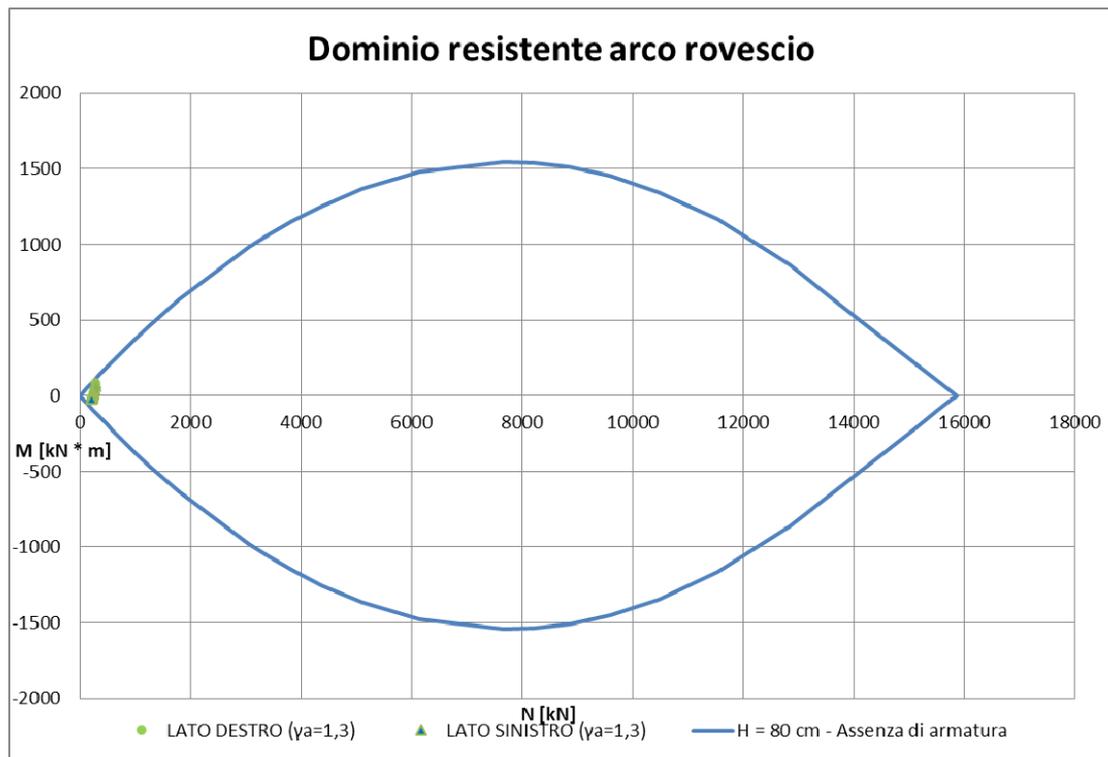
Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase). La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



Arco rovescio - H = 80 cm

Verifica SLU

Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Stato limite di fessurazione

### **Verifica nei confronti delle Punta tensionali**

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

Elemento	N [kN]	M [kN * m]
<i>Muretta sx</i>	218	64
<i>Muretta dx</i>	219	64
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	162	-17

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ X

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo:

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	80

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	74,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Verifica  N° iterazioni:

Precompresso

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n  
 N<sub>Ed</sub>  kN  
 M<sub>xEd</sub>  kNm  
 M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm²  $\epsilon_{cu}$   ‰  
 $E_s$   N/mm²  $f_{cd}$   ‰  
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ?  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$   ‰  
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm²  $\tau_{co}$   ‰  
 $\tau_{c1}$   ‰

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\sigma_s$   N/mm²  
 $\epsilon_s$   ‰  
 d  cm  
 x  x/d   
 $\delta$

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ X

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo:

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	80

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	74,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Verifica  N° iterazioni:

Precompresso

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n  
 N<sub>Ed</sub>  kN  
 M<sub>xEd</sub>  kNm  
 M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm²  $\epsilon_{cu}$   ‰  
 $E_s$   N/mm²  $f_{cd}$   ‰  
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ?  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$   ‰  
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm²  $\tau_{co}$   ‰  
 $\tau_{c1}$   ‰

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\sigma_s$   N/mm²  
 $\epsilon_s$   ‰  
 d  cm  
 x  x/d   
 $\delta$



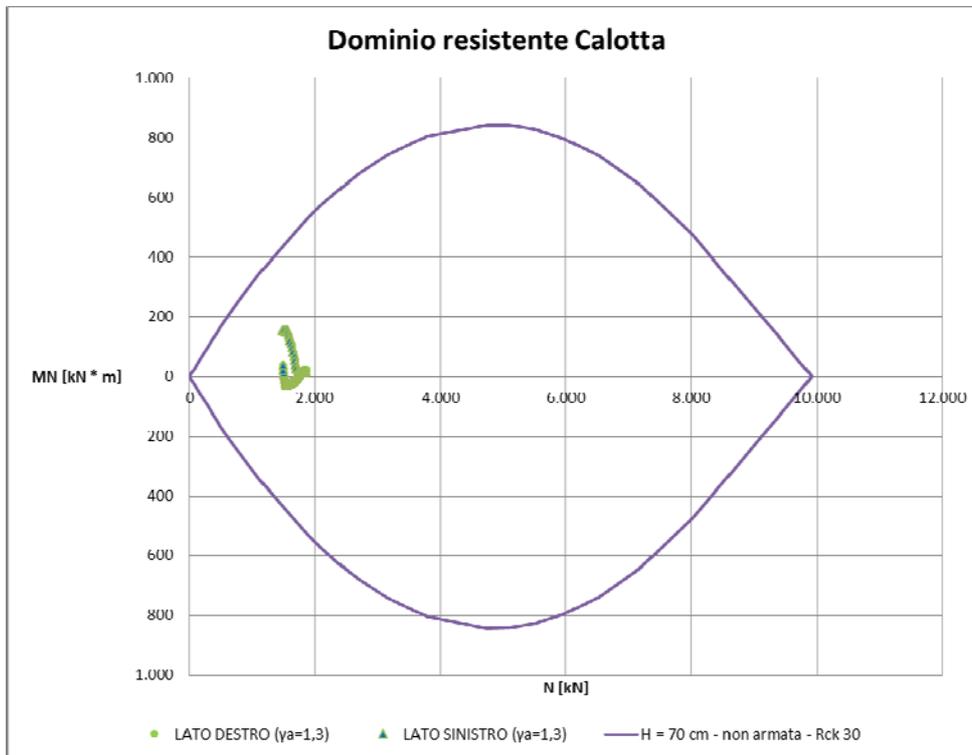
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione della muretta sinistra dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 800 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 745 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 745 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 47 [mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,1</sub> = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>f,1</sub> = 1 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,1</sub> = 3 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,2</sub> = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>f,2</sub> = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,2</sub> = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	f <sub>ck</sub> = 35 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub> = 3,2 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub> = 34077 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub> = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub> = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub> = 27,32 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 313,9 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	α <sub>e</sub> = 5,87 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	A <sub>s</sub> = 3 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	A <sub>c,eff.1</sub> = 137500 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.2</sub> = 162033 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.3</sub> = 400000 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.min</sub> = 137500 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	r <sub>p,eff</sub> = 2,28479E-05 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub> = 3,209962442 [MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub> = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	[ε <sub>sm</sub> -ε <sub>cm</sub> ] <sub>min</sub> = 0,00008196 [-]
	[ε <sub>sm</sub> -ε <sub>cm</sub> ] <sub>calc.</sub> = -0,28088581 [-]
	<b>[ε<sub>sm</sub>-ε<sub>cm</sub>] = 0,000082 [-]</b>
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	f <sub>eq</sub> = 1 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub> = 237,5 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub> = 0,800 [-] k <sub>2</sub> = 0,500 [-] k <sub>3</sub> = 3,400 [-] k <sub>4</sub> = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	S <sub>r,max.1</sub> = 7600,292769 [mm]
	S <sub>r,max.2</sub> = 631,93 [mm]
	<b>S<sub>r,max</sub> = 632 [mm]</b>
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>	
	w <sub>k,lim</sub> = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b>w<sub>k</sub> = 0,05 [mm]</b>

## Calotta – H = 70 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

#### **Verifica nei confronti delle Punta tensionali**

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

Elemento	N [kN]	M [kN * m]
<i>Rene sx</i>	1389	14
<i>Rene dx</i>	1389	15
<i>Chiave</i>	1149	30

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ □ ×

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	70

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	64,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  1389 kN  
 M<sub>xEd</sub>  14 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C35/45
$\epsilon_{su}$ 67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391,3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3,5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 19,03
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0,8 ?
$\epsilon_{syd}$ 1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 13,5
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²	$\tau_{co}$ 0,8
	$\tau_{c1}$ 2,257

$\sigma_c$  -2,156 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,138 ‰

Verifica  N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ □ ×

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	70

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	64,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  1389 kN  
 M<sub>xEd</sub>  15 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C35/45
$\epsilon_{su}$ 67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391,3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3,5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 19,03
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0,8 ?
$\epsilon_{syd}$ 1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 13,5
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²	$\tau_{co}$ 0,8
	$\tau_{c1}$ 2,257

$\sigma_c$  -2,168 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,1372 ‰

Verifica  N° iterazioni:

Precompresso



#### 4. VERIFICA SEZIONE TIPO - COPERTURA $15 < H < 25$ M

Le formazioni incluse nella tratta di copertura tra 15 e 25 m sono:

- Formazione di Camerino (Associazione Pelitica Arenacea)
- Formazione dello Schlier

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B0V	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
15 < z < 25	c'	[kPa]	50 – 60	50
	$\varphi'$	[°]	26 – 28	26
	E	[MPa]	100	100
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

##### 4.1 Sezione tipo B0V

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B0V.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una copertura pari a 25 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

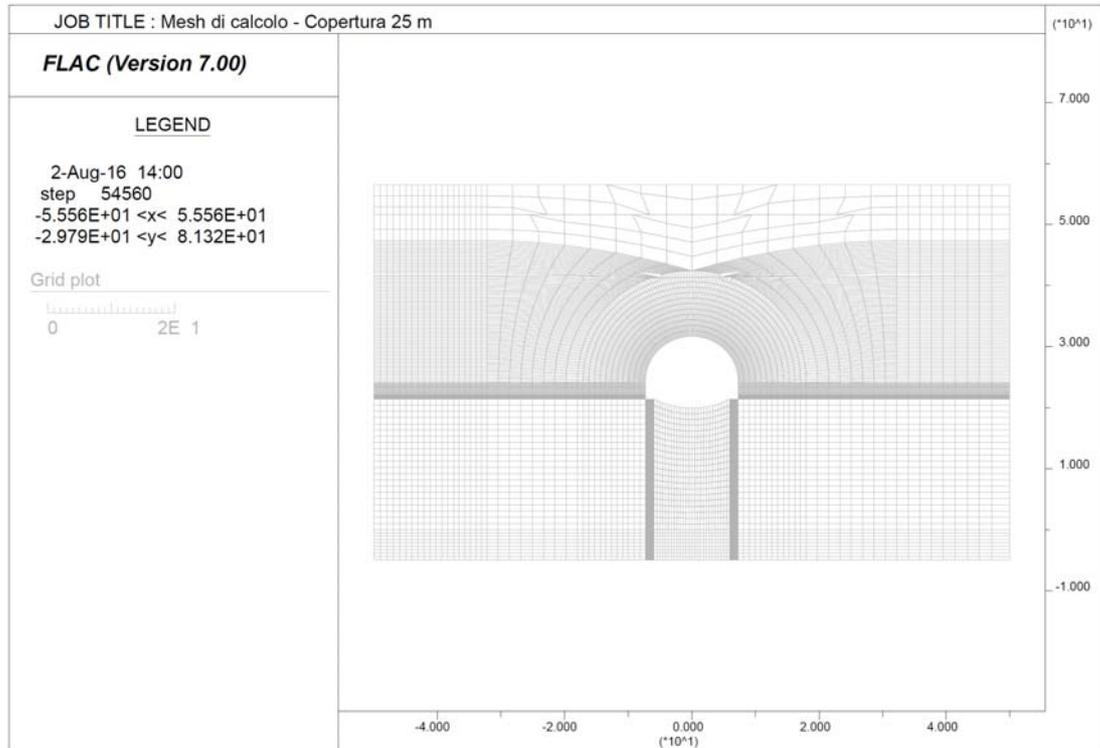
Il prerivestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

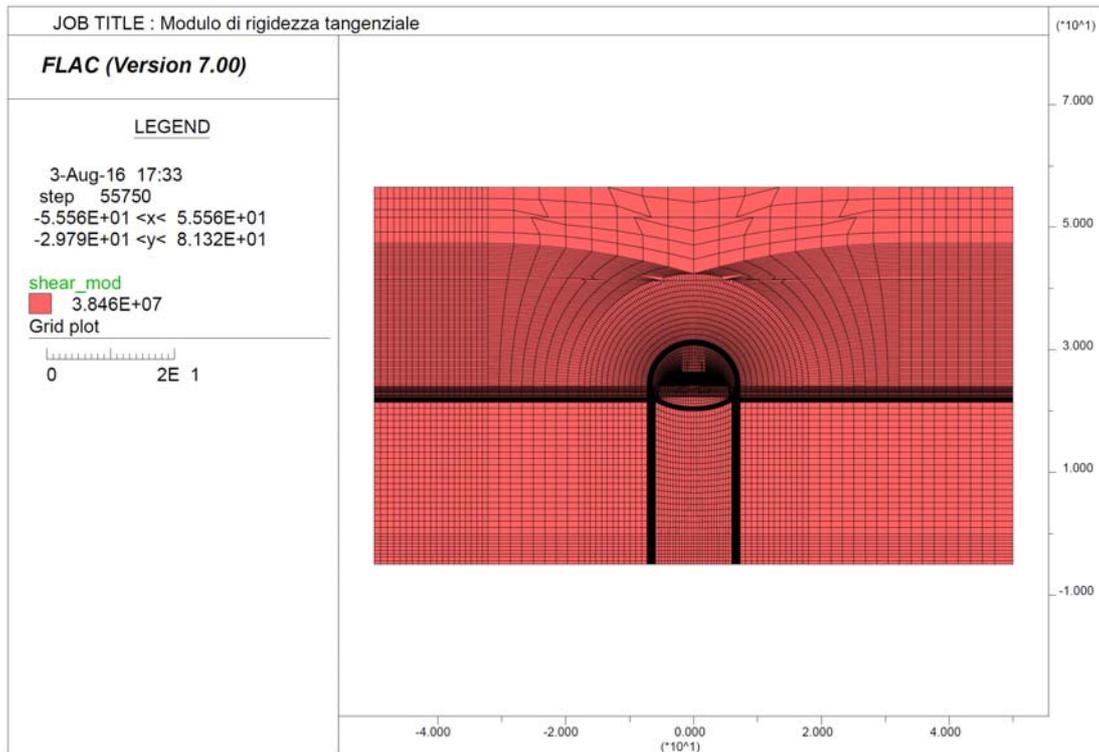
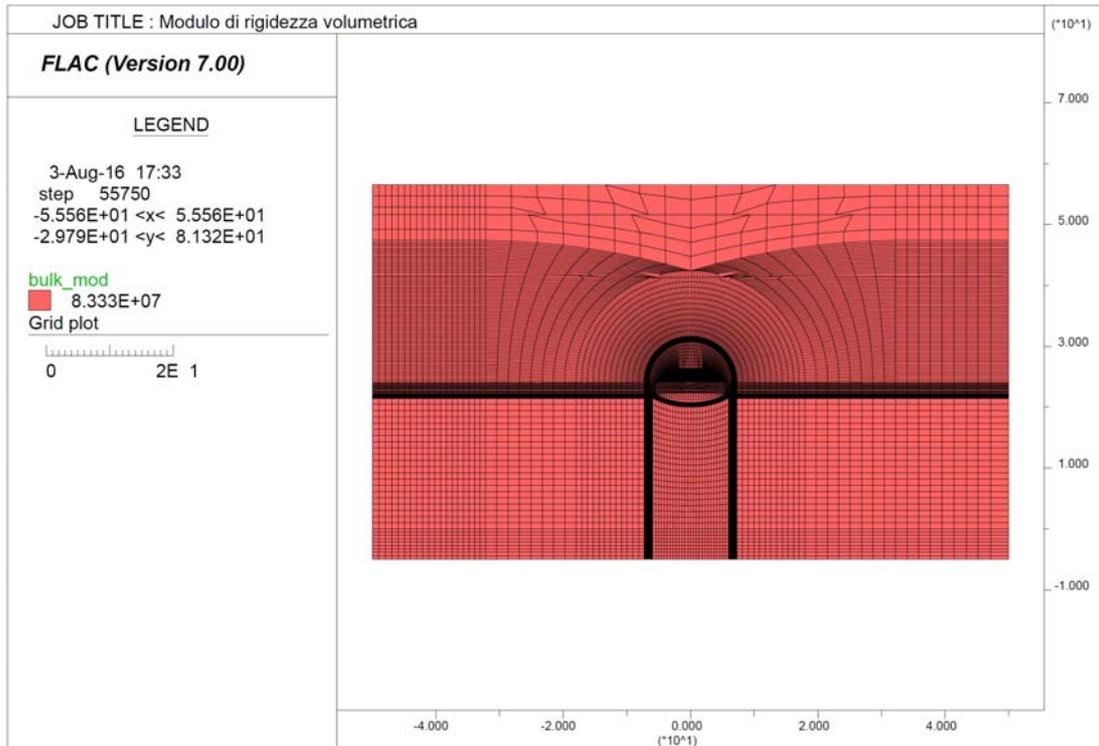
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

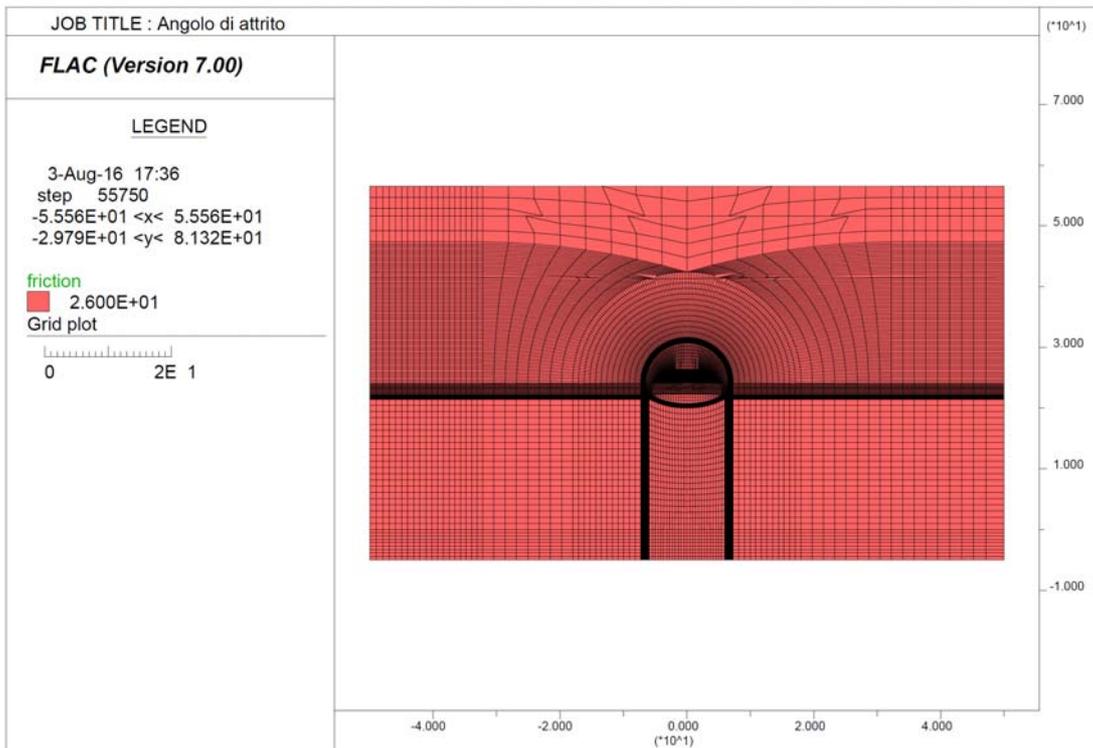
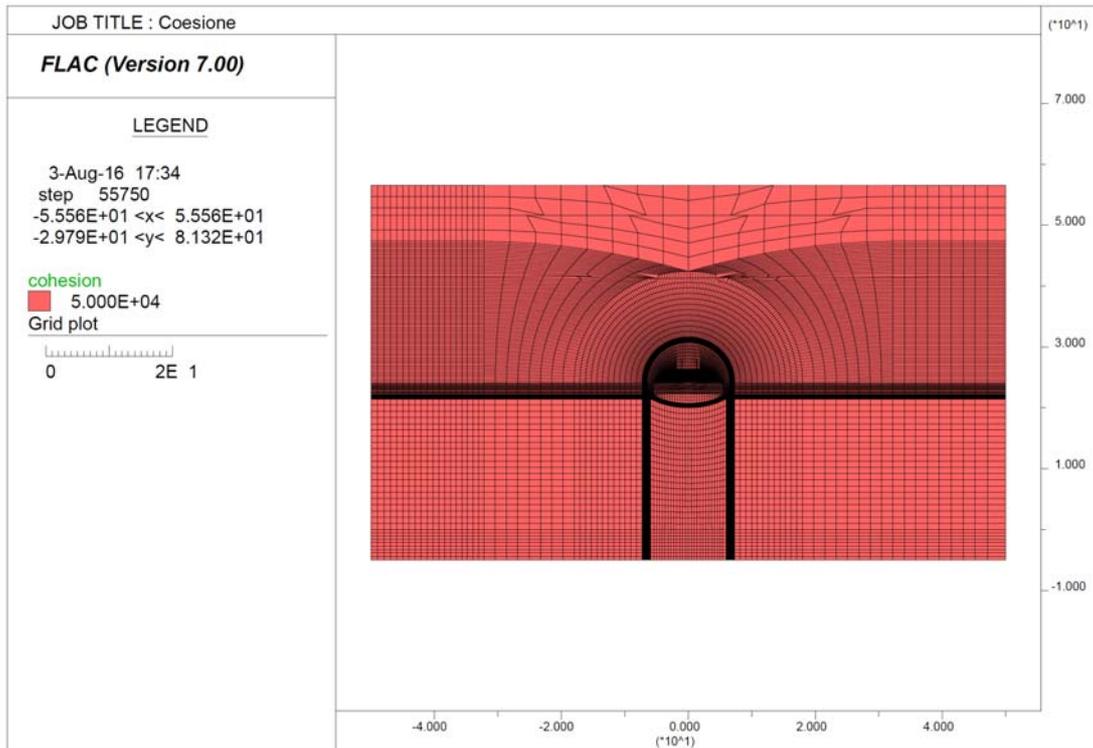
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

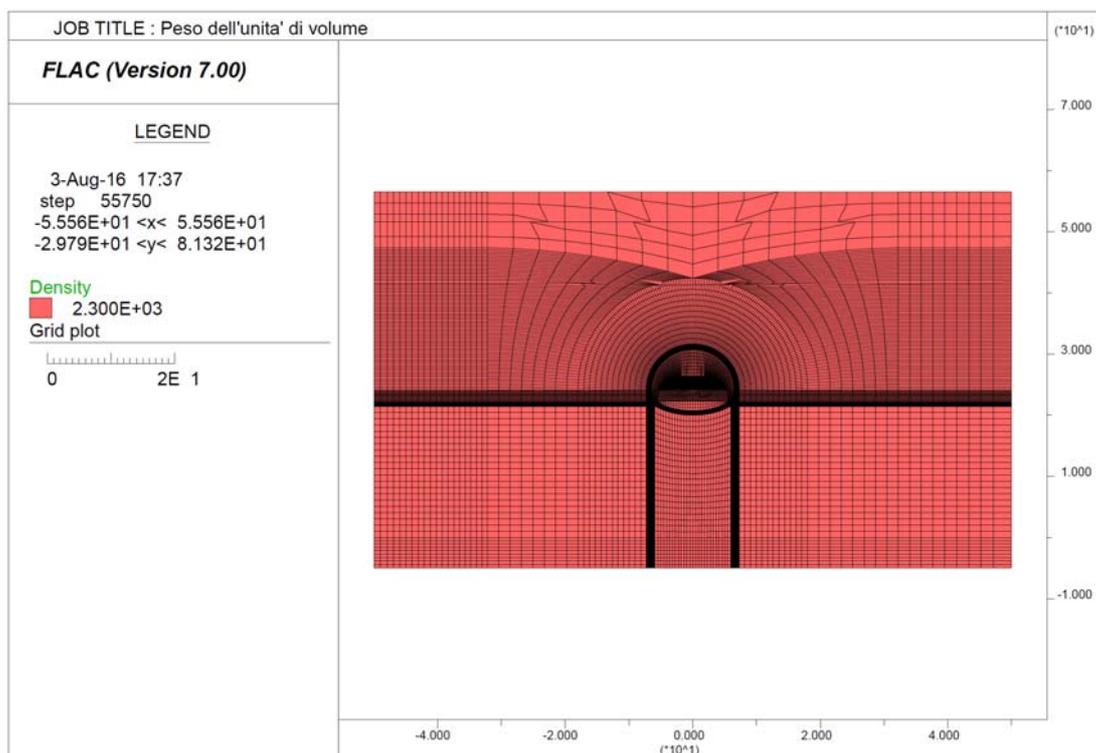
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo BOV - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	28,0%	0,65	-
Step 3	Scavo	1	37,9%	0,37*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	37,9%	0,37*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	77,0%	2,11*	1,74
Step 6	Avanzamento fino a deformazioni esaurite ( E SB = 31 Gpa)	-	100,0%	8,96*	8,6
Step 7	Getto arco rovescio e muretta	-	100,0%	-	8,6
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	8,6
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	8,6

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

#### **4.1.1 Fasi di calcolo**

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il pririvestimento e per il rivestimento definitivo.

Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

Fase 1 In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

Fase 2 Questa fase consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo e, classicamente, per classi di copertura fino a 25 m è simulata attraverso l'adozione di un fattore di rilascio pari al 28 %.

Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.379)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 200 / 100) con spritz beton (25 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.379)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a  $\frac{1}{2}$  D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton ( $E = 10$  GPa) (fattore di rilascio = 0.770)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio.

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

#### 4.1.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti

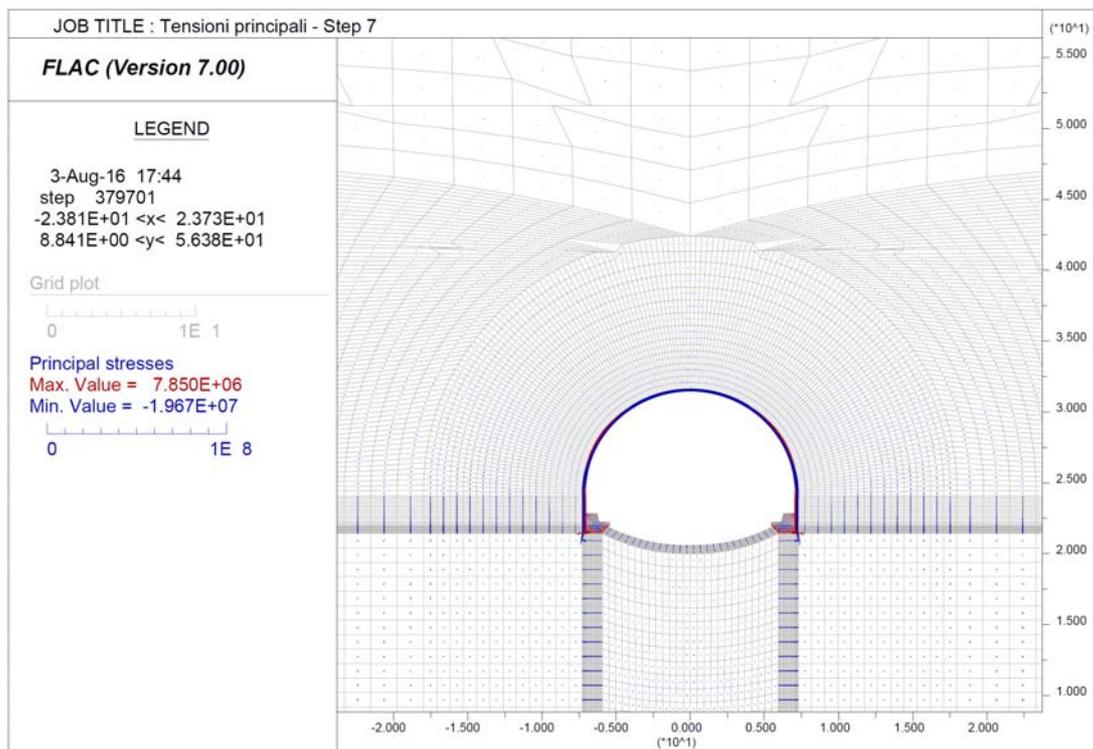
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

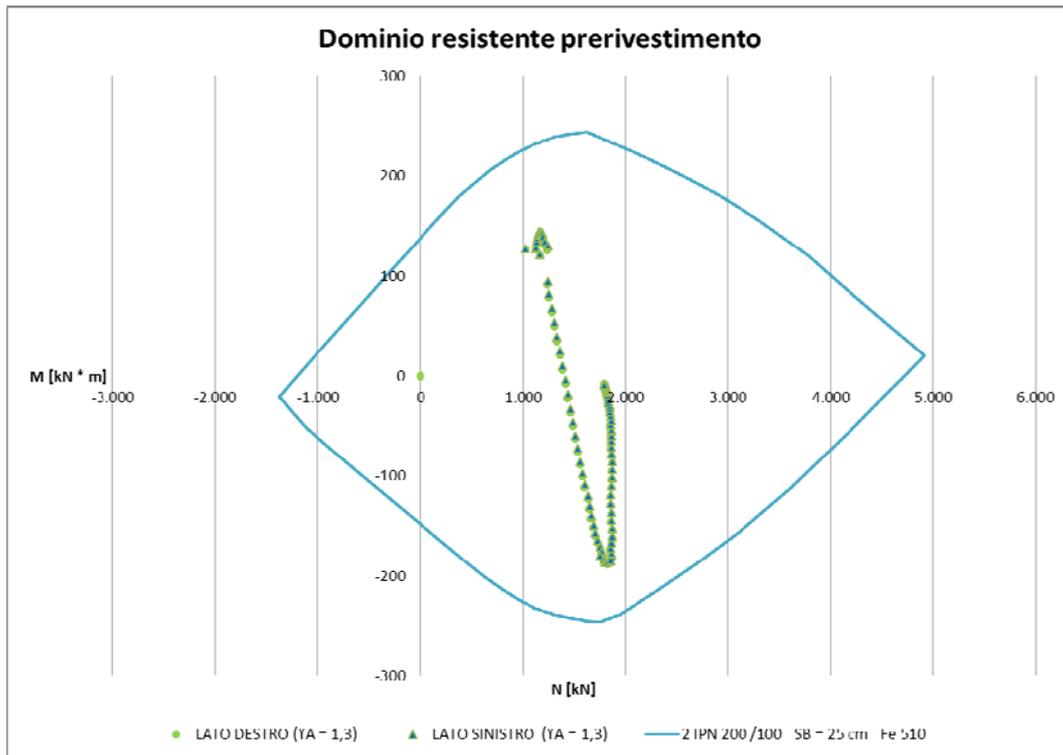
##### 4.1.1.1.1 Rivestimento di prima fase

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 200 / 100 – SB = 25 cm).



Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

**Verifica C.A. S.L.U. - File:**

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

---

**Titolo:** \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	25	1	20,34	1
			2	20,34	21

**Sollecitazioni**

S.L.U.    Metodo n

N<sub>Ed</sub>      kN

M<sub>xEd</sub>      kNm

M<sub>yEd</sub>      kNm

**P.to applicazione N**

Centro     Baricentro cls

Coord.[cm]    xN  yN

**Tipo rottura**

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

**Materiali**

Fe510		C25/30	
$\epsilon_{su}$	67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
f <sub>yd</sub>	338,1 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3,5 ‰
E <sub>s</sub>	200.000 N/mm <sup>2</sup>	f <sub>cd</sub>	14,17
E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>	15	f <sub>cc</sub> /f <sub>cd</sub>	0,8
$\epsilon_{syd}$	1,691 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9,75
$\sigma_{s,adm}$	240 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0,6
		$\tau_{c1}$	1,829

M<sub>xRd</sub>  kN m

$\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_s$   N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_c$   ‰

$\epsilon_s$   ‰

d  cm

x  x/d   $\delta$

**Metodo di calcolo**

S.L.U.+     S.L.U.-

Metodo n

**Tipo flessione**

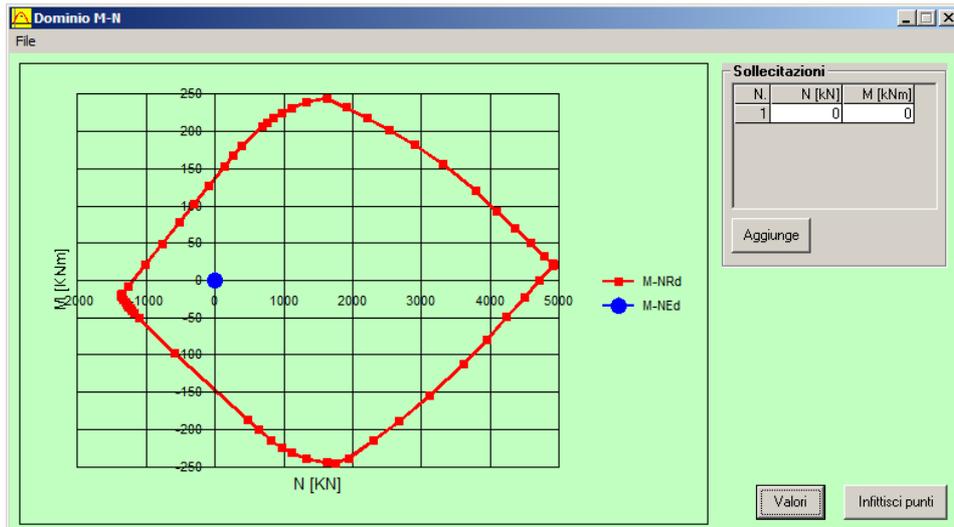
Retta     Deviata

N° rett.

Calcola MRd    Dominio M-N

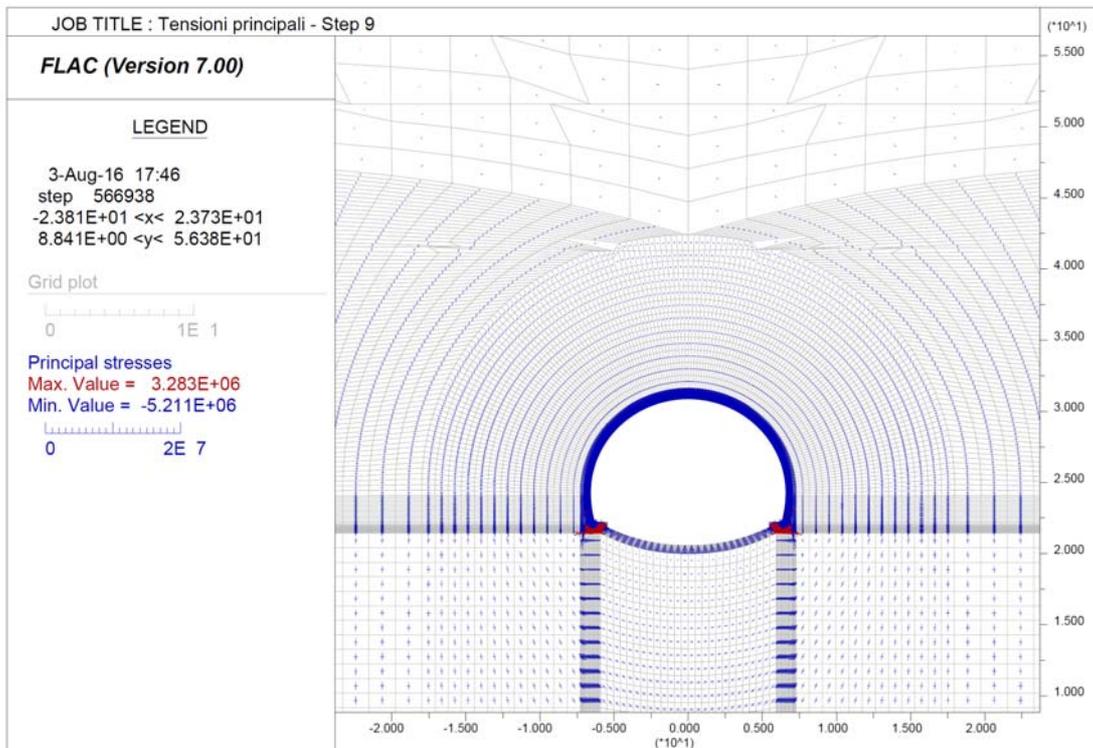
L<sub>0</sub>  cm    Col. modello

Precompresso



#### 4.1.1.1.2 Rivestimento definitivo

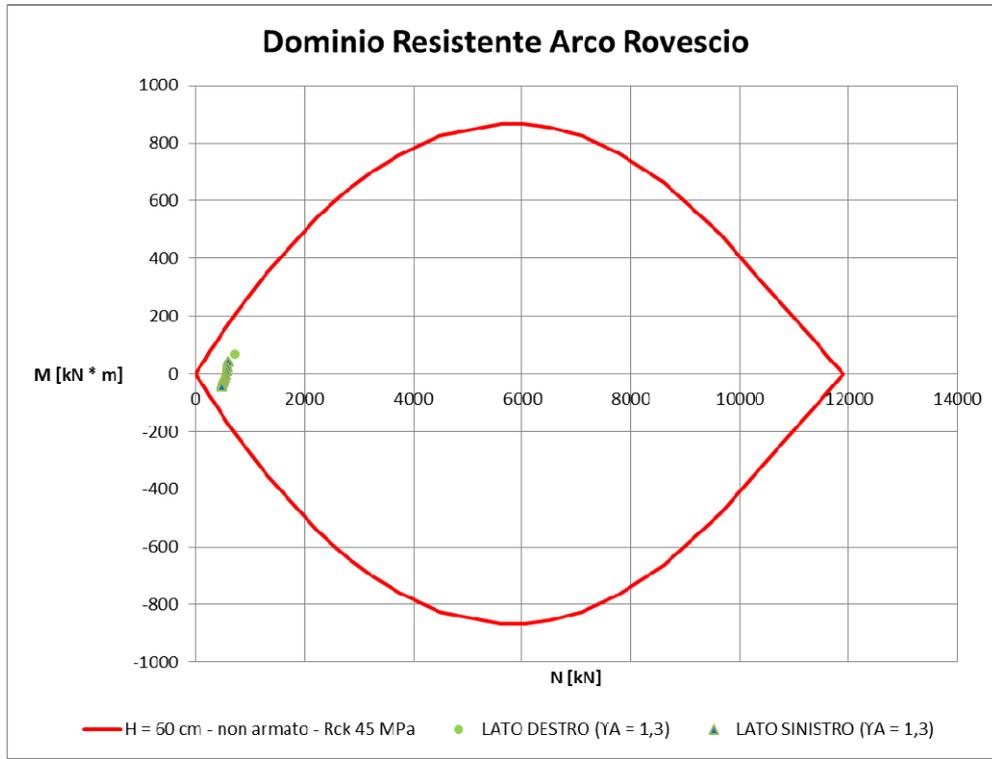
Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase). La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



## Arco rovescio - H = 60 cm

### Verifica SLU

#### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punte tensionali
- Stato limite di fessurazione

#### ***Verifica nei confronti delle Punte tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	437	8
<i>Muretta dx</i>	437	3
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	371	-34

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Solecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 437 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 8 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Materiali

B450C	C35/45
$\epsilon_{su}$ 67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391,3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3,5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 19,83
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0,8
$\epsilon_{syd}$ 1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 13,5
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²	$\tau_{co}$ 0,8
	$\tau_{c1}$ 2,257

$\sigma_c$  -0,8617 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,04646 ‰

Verifica N° iterazioni: 0

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Solecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 437 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 3 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Materiali

B450C	C35/45
$\epsilon_{su}$ 67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391,3 N/mm²	$\epsilon_{cu}$ 3,5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm²	$f_{cd}$ 19,83
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0,8
$\epsilon_{syd}$ 1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 13,5
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²	$\tau_{co}$ 0,8
	$\tau_{c1}$ 2,257

$\sigma_c$  -0,7783 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,05156 ‰

Verifica N° iterazioni: 0

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	0	5,5
			2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>   kN  
 M<sub>xEd</sub>   kNm  
 M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	<input type="text" value="67,5"/> ‰	$\epsilon_{c2}$	<input type="text" value="2"/> ‰
$f_{yd}$	<input type="text" value="391,3"/> N/mm²	$\epsilon_{cu}$	<input type="text" value="3,5"/> ‰
$E_s$	<input type="text" value="200.000"/> N/mm²	$f_{cd}$	<input type="text" value="19,83"/> ‰
$E_s/E_c$	<input type="text" value="15"/>	$f_{cc}/f_{cd}$	<input type="text" value="0,8"/> ?
$\epsilon_{syd}$	<input type="text" value="1,957"/> ‰	$\sigma_{c,adm}$	<input type="text" value="13,5"/>
$\sigma_{s,adm}$	<input type="text" value="255"/> N/mm²	$\tau_{co}$	<input type="text" value="0,8"/>
		$\tau_{c1}$	<input type="text" value="2,257"/>

$\sigma_c$   N/mm²

Verifica  
 N° iterazioni:

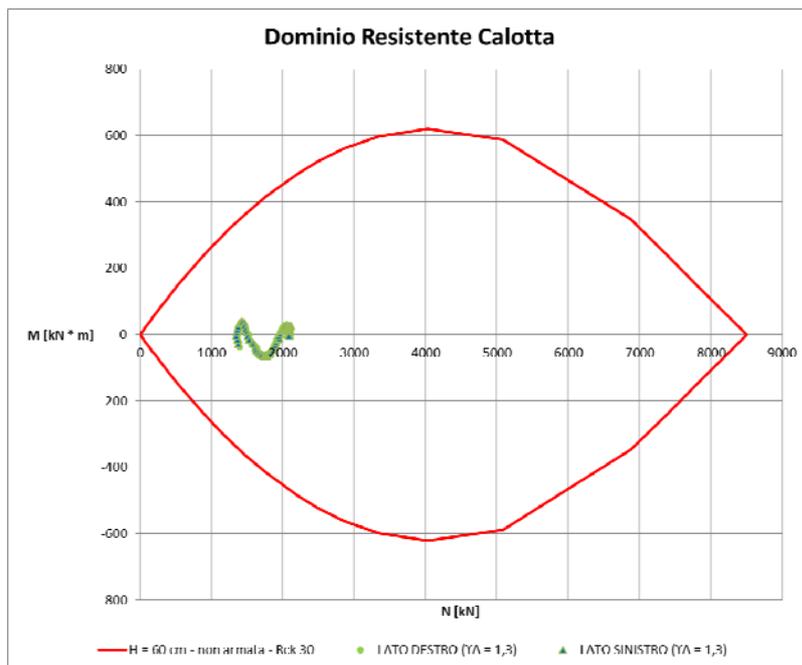
Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

Calotta – H = 60 cm

Momento flettente



## Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punte tensionali
- Apertura delle fessure

### Verifica nei confronti delle Punte tensionali

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

Elemento	N [kN]	M [kN * m]
Rene sx	1541	14
Rene dx	1550	19
Chiave	1602	-4

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. The main window displays the following information:

- Titolo:** (Empty field)
- N° figure elementari:** 1 (Zoom)
- N° strati barre:** 2 (Zoom)
- Tipo Sezione:**
  - Rettan.re
  - Trapezi
  - a T
  - Circolare
  - Rettangoli
  - Coord.
- Table 1 (Dimensions):**

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60
- Table 2 (Reinforcement):**

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5
- Sollecitazioni:**
  - Method: S.L.U. / Metodo n
  - N<sub>Ed</sub>: 1541 kN
  - M<sub>xEd</sub>: 14 kNm
  - M<sub>yEd</sub>: 0
- P.to applicazione N:**
  - Centro
  - Baricentro cls
  - Coord.[cm] (xN: 0, yN: 0)
- Metodo di calcolo:**
  - S.L.U. +
  - S.L.U. -
  - Metodo n
- Materiali:**
  - B450C:** ε<sub>su</sub> 67.5 ‰, f<sub>yd</sub> 391.3 N/mm², E<sub>s</sub> 200.000 N/mm², E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15, ε<sub>syd</sub> 1.957 ‰, σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm²
  - C25/30:** ε<sub>c2</sub> 2 ‰, ε<sub>cu</sub> 3.5 ‰, f<sub>cd</sub> 14.17 N/mm², f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0.8, σ<sub>c,adm</sub> 9.75 N/mm², τ<sub>co</sub> 0.6 N/mm², τ<sub>c1</sub> 1.829 N/mm²
- Results:**
  - σ<sub>c</sub>: -2.802 N/mm²
  - ε<sub>ci</sub>: -0.1783 ‰
- Verifica:**
  - N° iterazioni: 0
  - Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Solecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  1550 kN  
 M<sub>Ed</sub>  19 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C25/30
$\epsilon_{su}$ 67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391,3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$ 3,5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$ 14,17
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0,8 ?
$\epsilon_{syd}$ 1,957 ‰	$G_{c,adm}$ 9,75
$G_{s,adm}$ 255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$ 0,6
	$\tau_{c1}$ 1,829

$\sigma_c$  -2,9 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{ci}$  -0,1744 ‰

Verifica N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Solecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  1602 kN  
 M<sub>Ed</sub>  -4 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C	C25/30
$\epsilon_{su}$ 67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 391,3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$ 3,5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$ 14,17
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0,8 ?
$\epsilon_{syd}$ 1,957 ‰	$G_{c,adm}$ 9,75
$G_{s,adm}$ 255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$ 0,6
	$\tau_{c1}$ 1,829

$\sigma_c$  -2,737 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{ci}$  -0,1962 ‰

Verifica N° iterazioni:

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

## 4.2 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza minimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
15 < z < 25	c'	[kPa]	120 – 150	120
	$\varphi'$	[°]	31 – 35	31
	E	[MPa]	100	100
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B2.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una condizione di copertura pari a 25 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

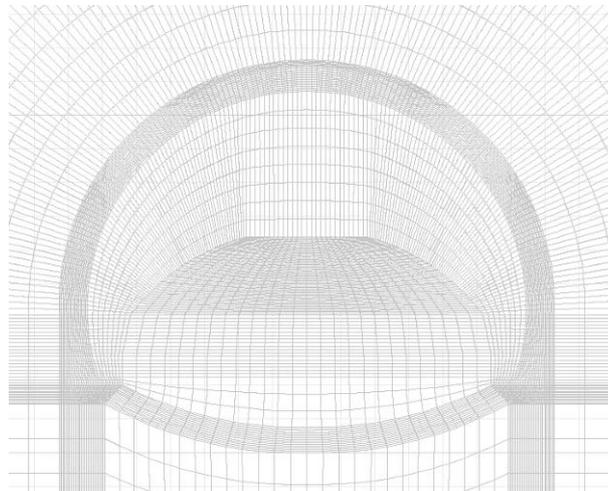
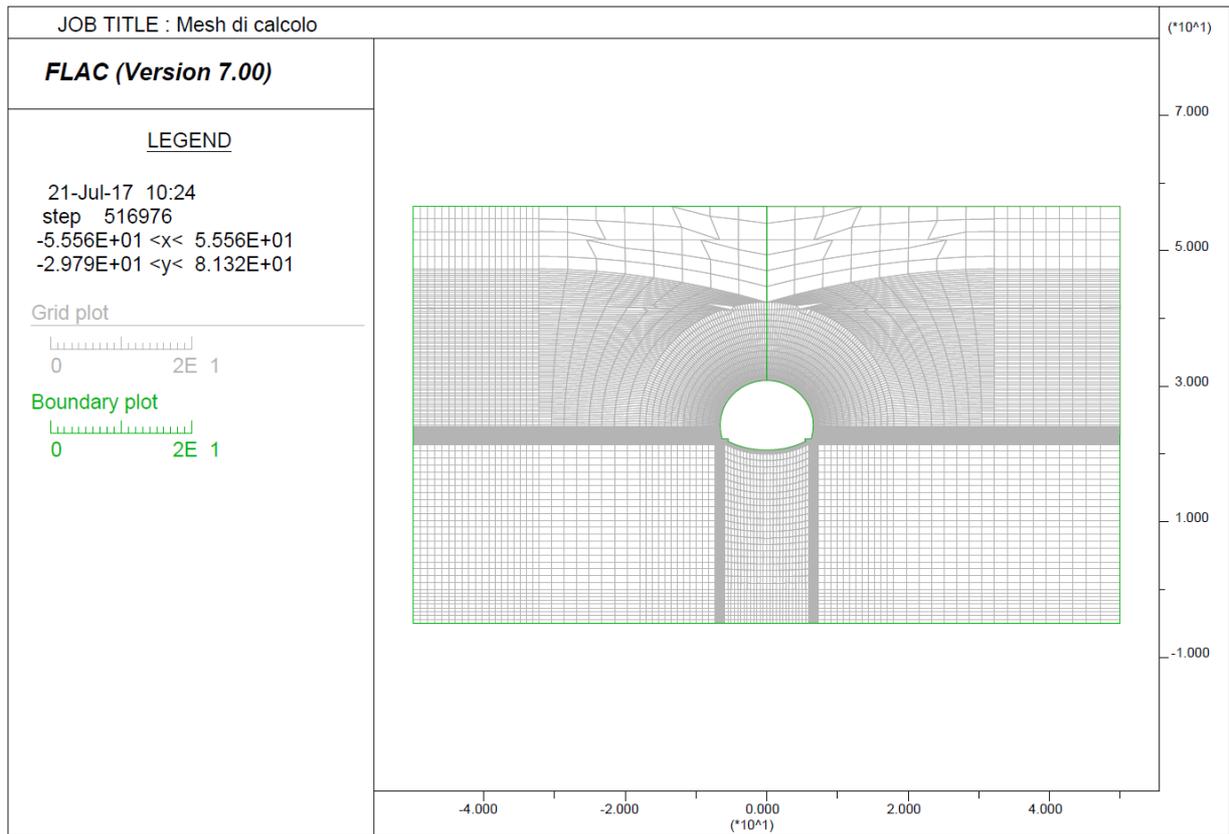
Il prerinvestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

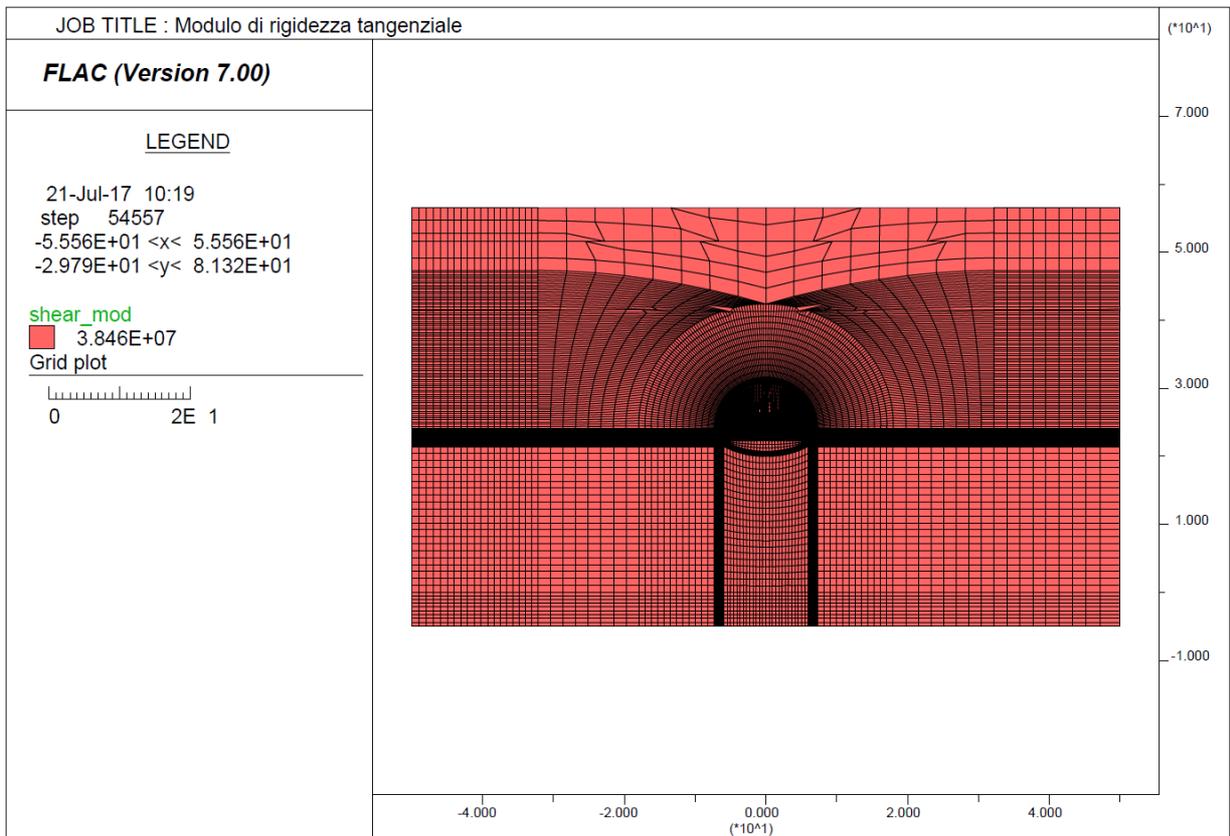
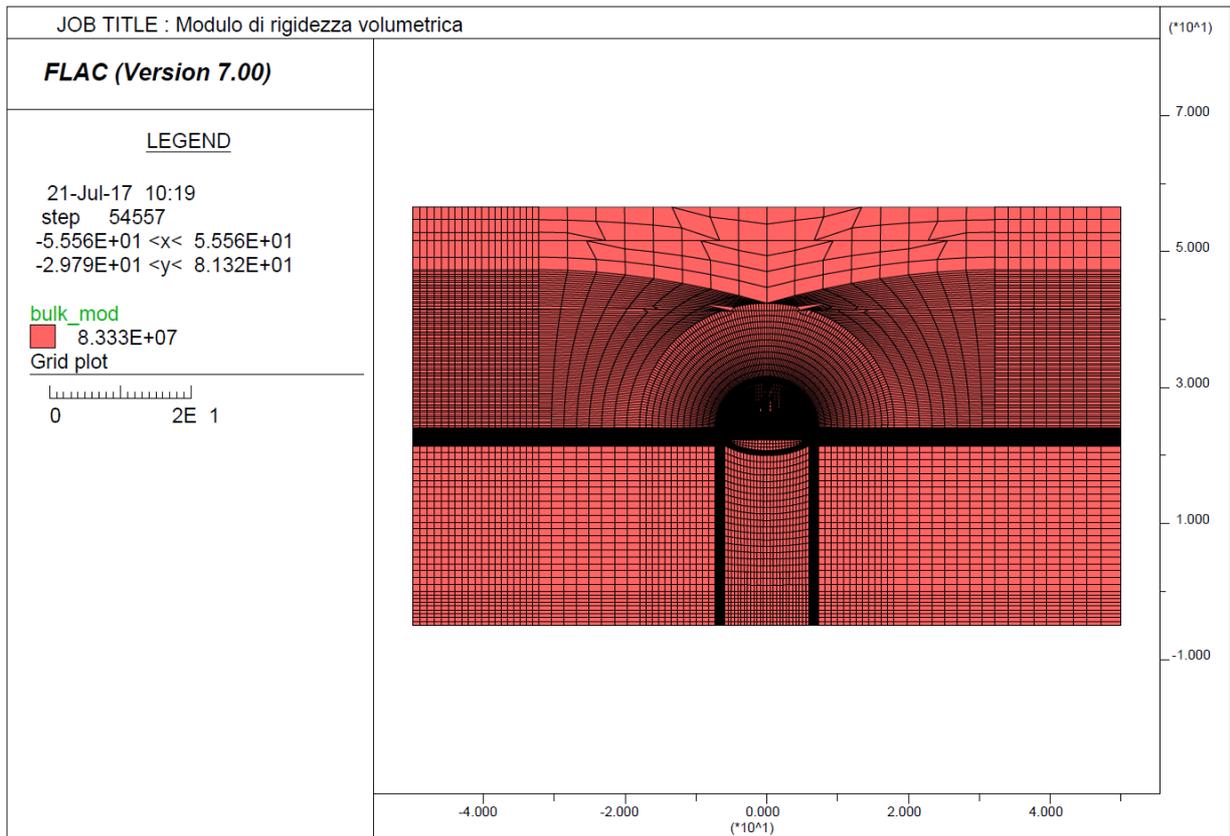
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

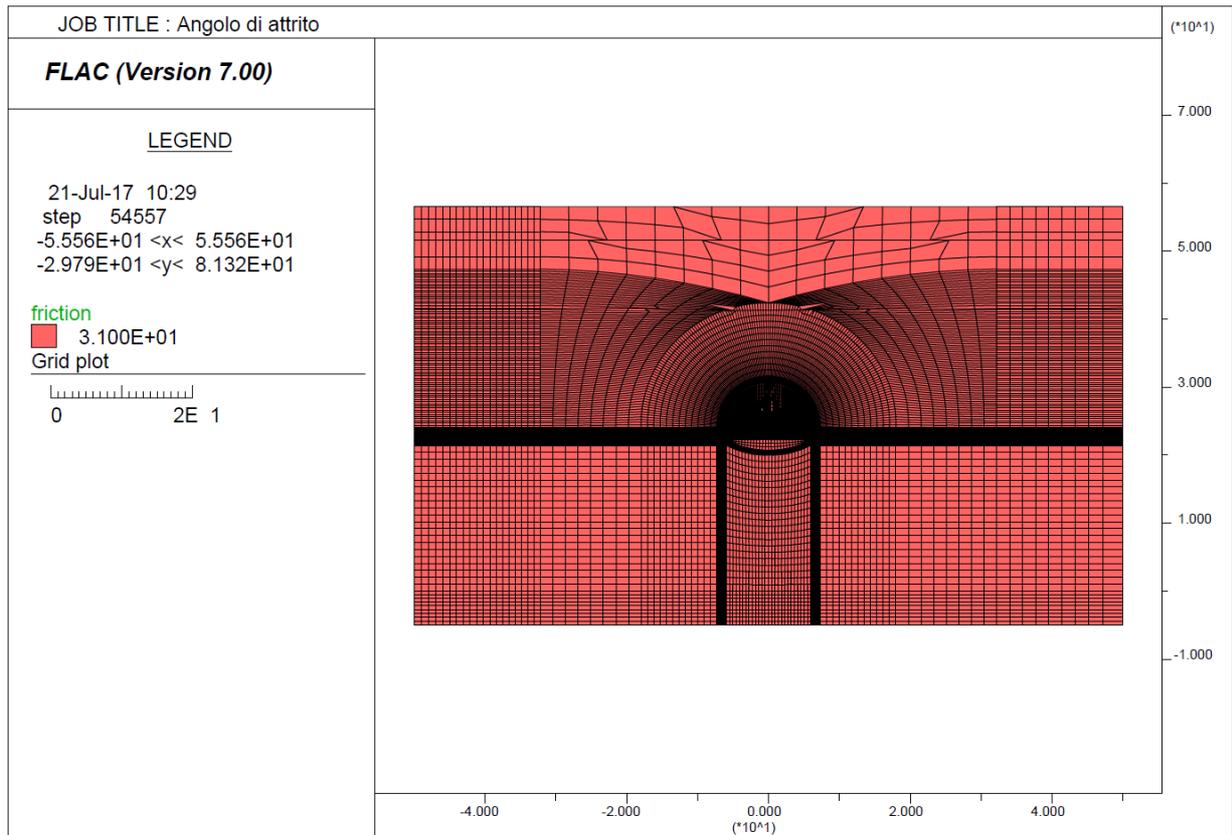
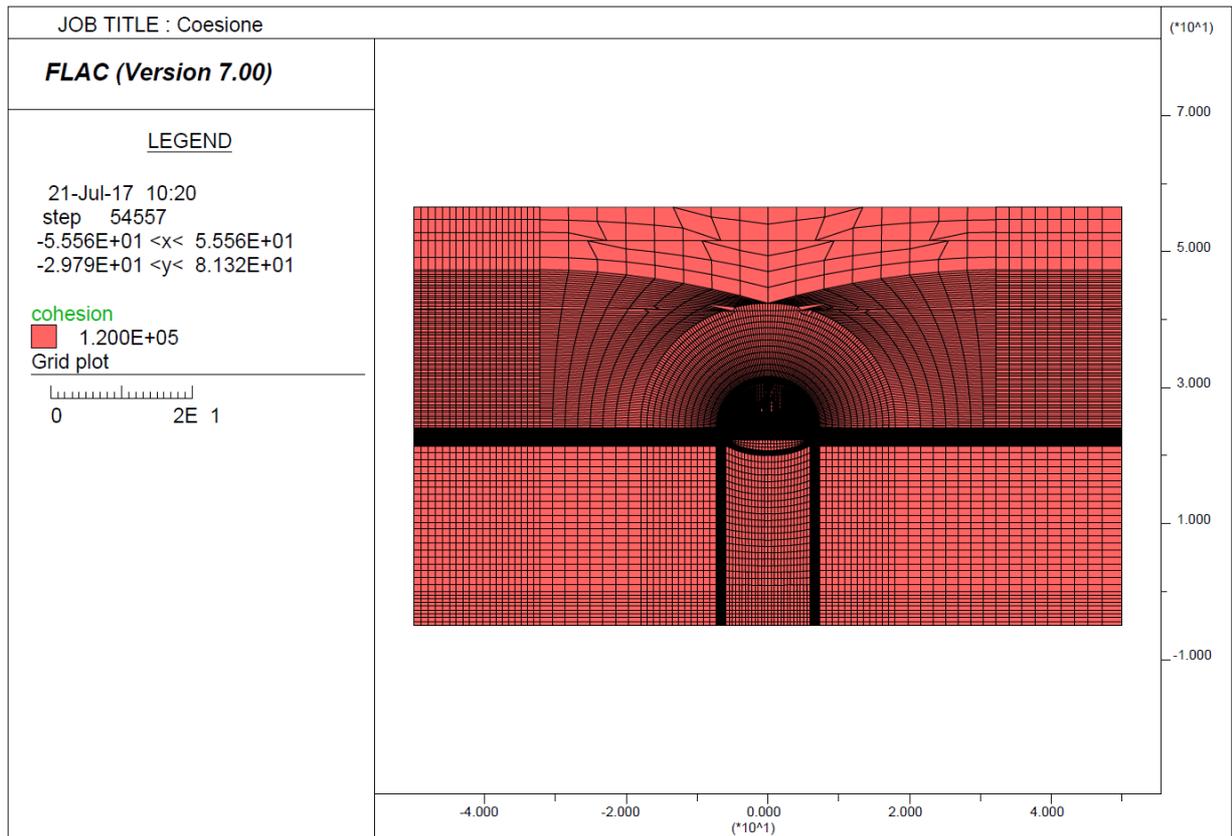
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

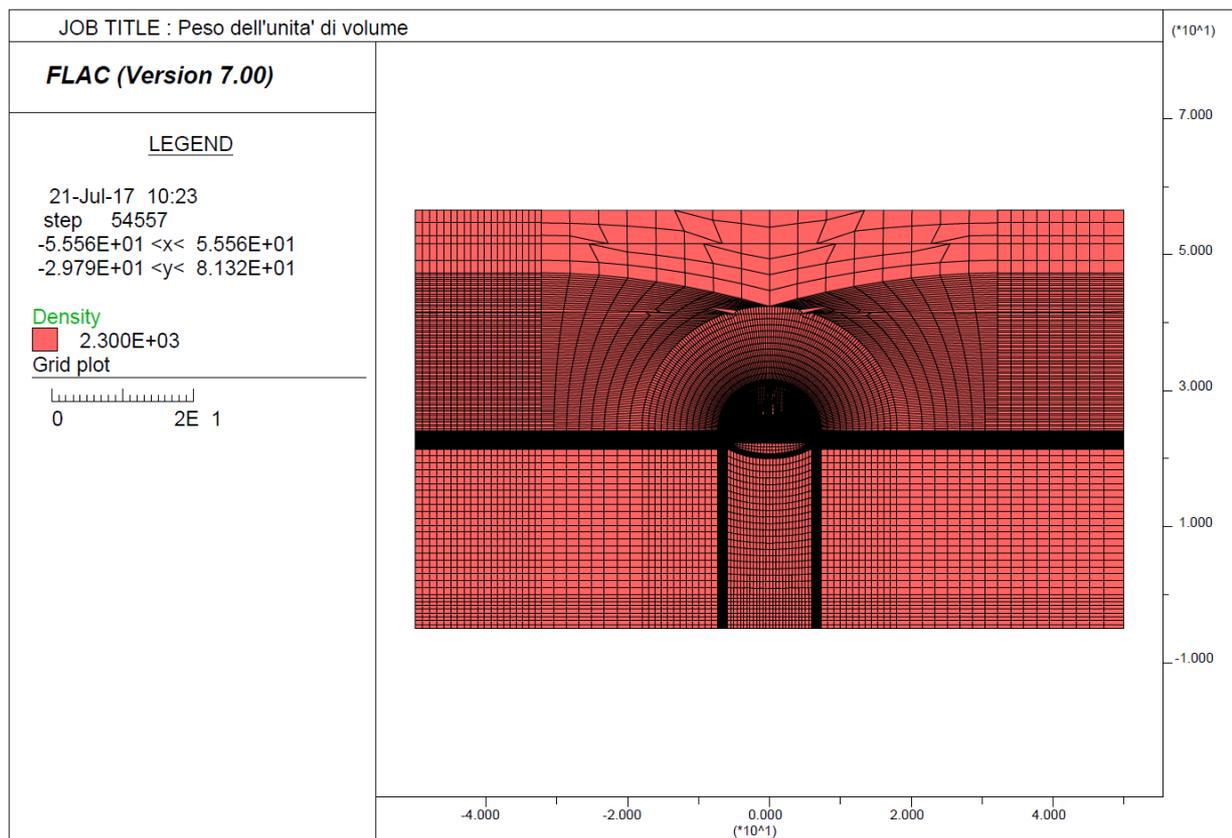
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo B2 - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	28,0%	0,64	-
Step 3	Scavo	1	37,9%	0,23*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	37,9%	0,23*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	77,0%	0,8*	0,57
Step 6	Avanzamento 2 D ( E SB = 31 Gpa)	29	91,4%	1,34*	1,11
Step 7	Getto arco rovescio e muretta a 2D e avanzamento fino a deformazioni esaurite	-	100,0%	-	1,11
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	1,11
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	1,11

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

#### **4.2.1 Fasi di calcolo**

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il pririvestimento e per il rivestimento definitivo.

Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

Fase 1 In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

Fase 2 Questa fase consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo e, classicamente, per classi di copertura fino a 25 m è simulata attraverso l'adozione di un fattore di rilascio pari al 28 %.

Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.379)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 180 / 100) con spritz beton (20 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.379)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a  $\frac{1}{2}$  D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton ( $E = 10$  GPa) (fattore di rilascio = 0.770)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino a 2 D (fattore di rilascio = 0.914).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1.00)

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

#### 4.2.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti

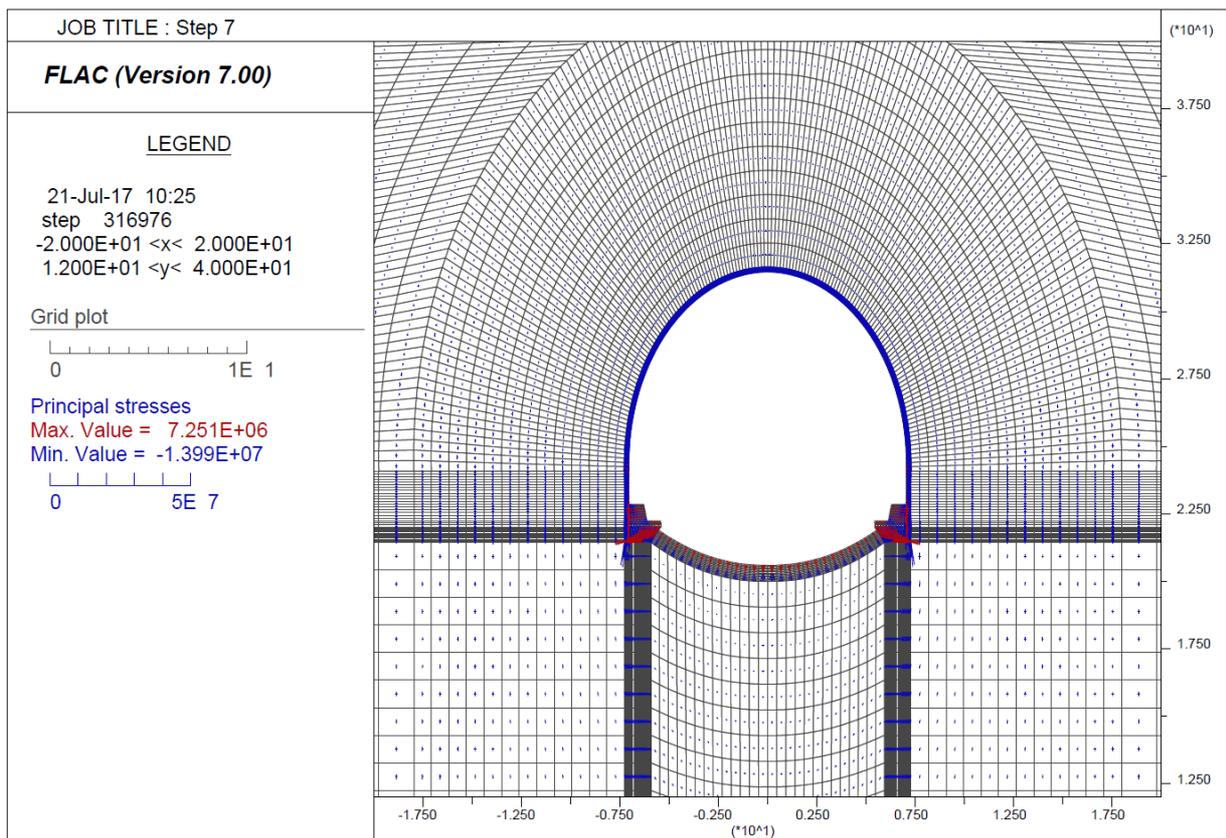
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

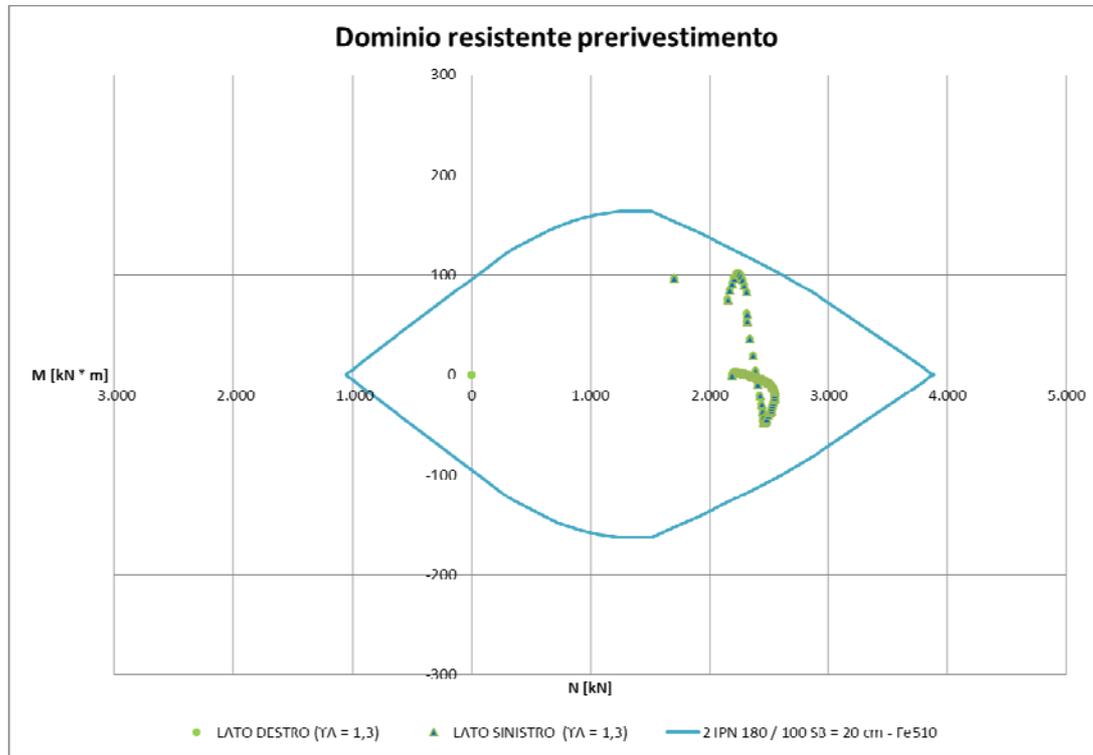
##### 4.2.1.1.1 Rivestimento di prima fase

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 180 / 100 – SB = 20 cm).



Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

Verifica C.A. S.L.U. - File: [ ] [ ] [ ] [ ]

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: [ ]

N° strati barre: 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	20	1	17,056	1
			2	17,056	19

Tipo Sezione  
 Rettang.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 0 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura  
Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Tipo flessione  
 Retta  Deviata

Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello

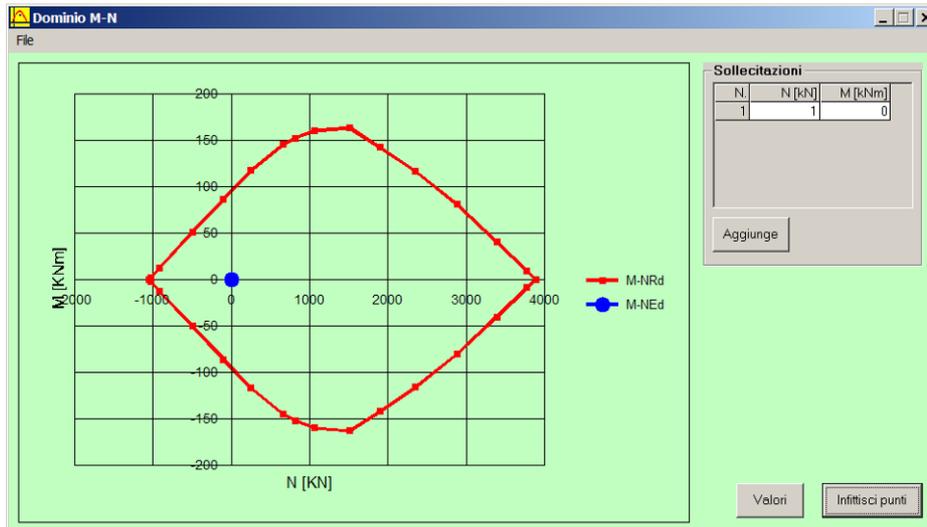
Precompresso

Materiali

Fe510	C25/30
ε <sub>su</sub> 67.5 ‰	ε <sub>c2</sub> 2 ‰
f <sub>yd</sub> 308.7 N/mm²	ε <sub>cu</sub> 3.5 ‰
E <sub>s</sub> 200.000 N/mm²	f <sub>cd</sub> 14.17
E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub> 15	f <sub>cc</sub> /f <sub>cd</sub> 0.8
ε <sub>syd</sub> 1.544 ‰	σ <sub>c,adm</sub> 9.75
σ <sub>s,adm</sub> 240 N/mm²	τ <sub>co</sub> 0.6
	τ <sub>cl</sub> 1.829

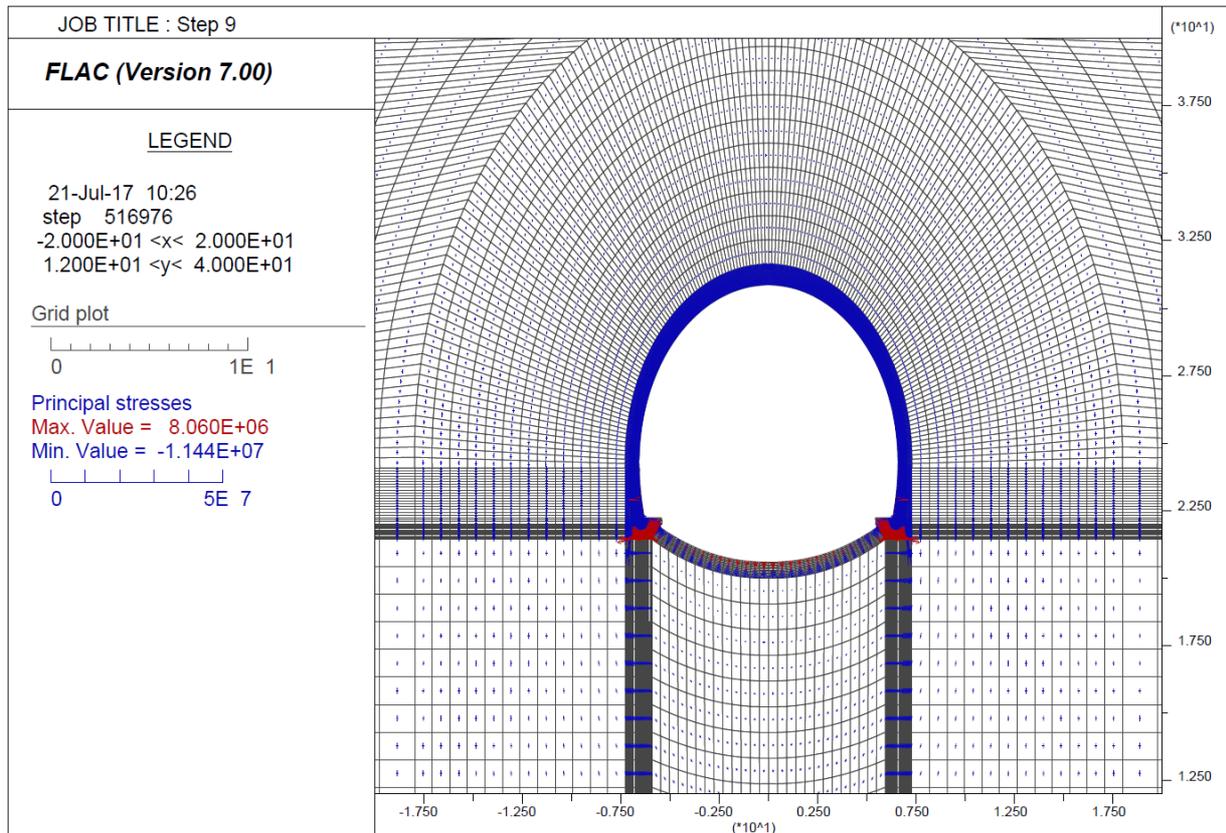
M<sub>xRd</sub> 95,52 kNm

σ<sub>c</sub> -14,17 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 308,7 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 3,5 ‰  
ε<sub>s</sub> 42,82 ‰  
d 19 cm  
x 1,436 x/d 0,07556  
δ 0,7



#### 4.2.1.1.2 Rivestimento definitivo

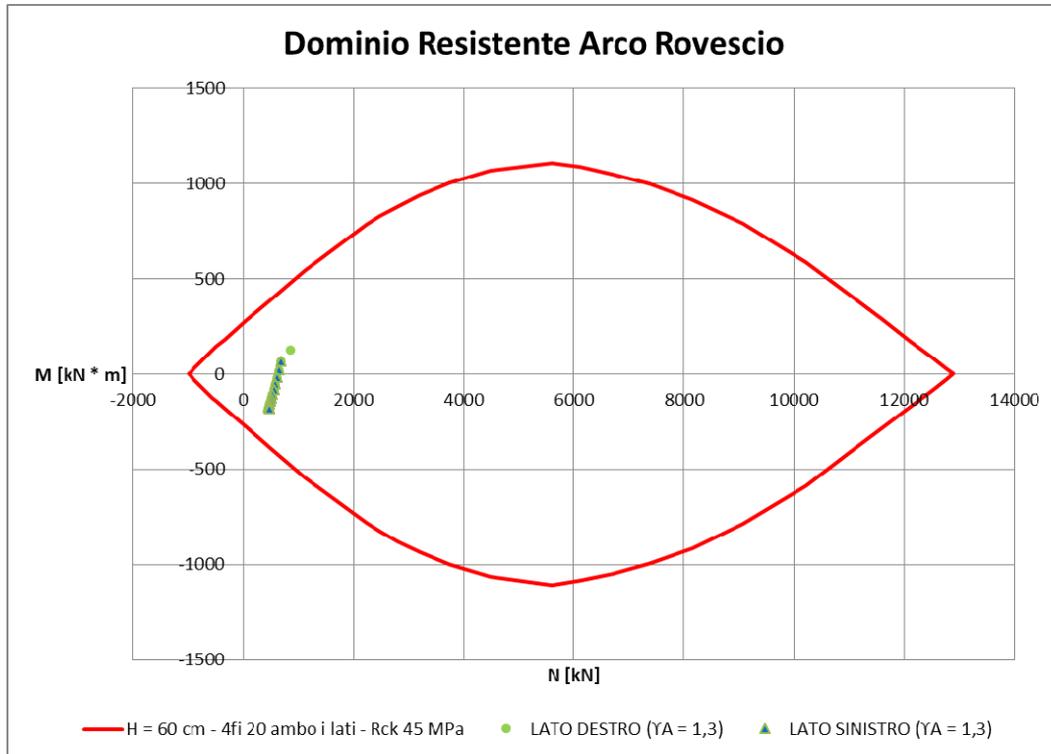
Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase). La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



## Arco rovescio - H = 60 cm

### Verifica SLU

#### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Stato limite di fessurazione

#### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	522	49
<i>Muretta dx</i>	528	49
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	364	-138

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ □ ×

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	12,57	5,5
			2	12,57	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>   kN  
 M<sub>xEd</sub>   kNm  
 M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	<input type="text" value="67.5"/> ‰	$\epsilon_{c2}$	<input type="text" value="2"/> ‰
f <sub>yd</sub>	<input type="text" value="391.3"/> N/mm²	$\epsilon_{cu}$	<input type="text" value="3.5"/> ‰
E <sub>s</sub>	<input type="text" value="200.000"/> N/mm²	f <sub>cd</sub>	<input type="text" value="19.83"/> ‰
E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>	<input type="text" value="15"/>	f <sub>cc</sub> /f <sub>cd</sub>	<input type="text" value="0.8"/> ?
$\epsilon_{syd}$	<input type="text" value="1.957"/> ‰	$\sigma_{c,adm}$	<input type="text" value="13.5"/>
$\sigma_{s,adm}$	<input type="text" value="255"/> N/mm²	$\tau_{co}$	<input type="text" value="0.8"/>
		$\tau_{cl}$	<input type="text" value="2.257"/>

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\epsilon_s$   ‰

Verifica  N° iterazioni: 0

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ □ ×

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	12,57	5,5
			2	12,57	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>   kN  
 M<sub>xEd</sub>   kNm  
 M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	<input type="text" value="67.5"/> ‰	$\epsilon_{c2}$	<input type="text" value="2"/> ‰
f <sub>yd</sub>	<input type="text" value="391.3"/> N/mm²	$\epsilon_{cu}$	<input type="text" value="3.5"/> ‰
E <sub>s</sub>	<input type="text" value="200.000"/> N/mm²	f <sub>cd</sub>	<input type="text" value="19.83"/> ‰
E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>	<input type="text" value="15"/>	f <sub>cc</sub> /f <sub>cd</sub>	<input type="text" value="0.8"/> ?
$\epsilon_{syd}$	<input type="text" value="1.957"/> ‰	$\sigma_{c,adm}$	<input type="text" value="13.5"/>
$\sigma_{s,adm}$	<input type="text" value="255"/> N/mm²	$\tau_{co}$	<input type="text" value="0.8"/>
		$\tau_{cl}$	<input type="text" value="2.257"/>

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\epsilon_s$   ‰

Verifica  N° iterazioni: 0

Precompresso



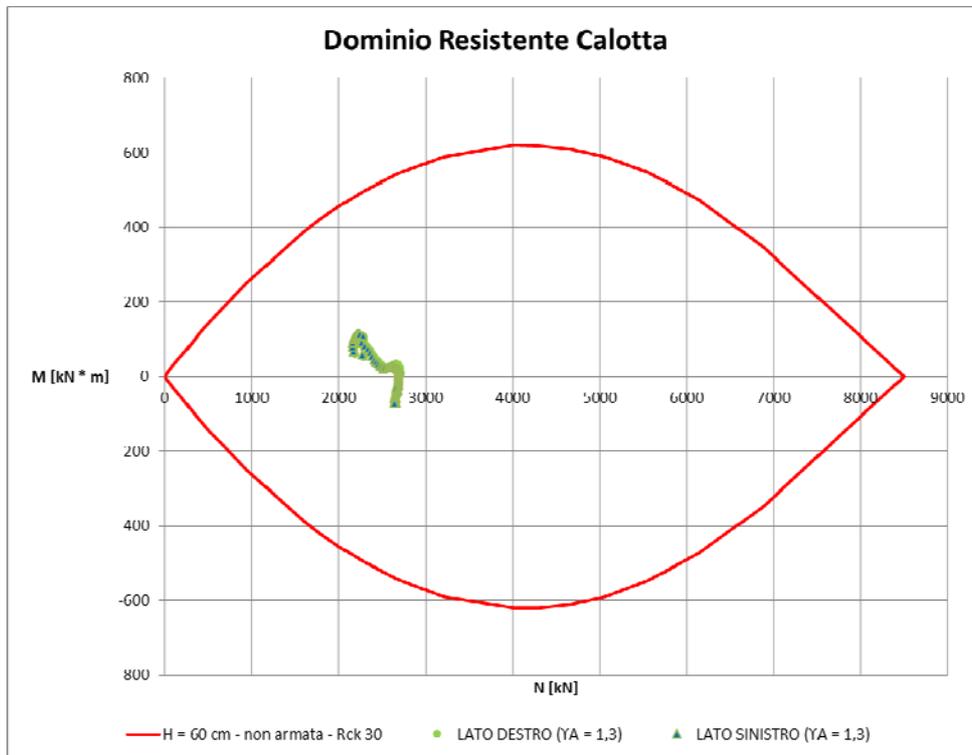
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione di mezzeria dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 600 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 545 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 65 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 55 [mm]
<a href="#">Armatura tesa ordinaria</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,1</sub> = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>f,1</sub> = 20 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,1</sub> = 1257 [mm <sup>2</sup> ]
<a href="#">Armatura tesa di infittimento</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,2</sub> = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>f,2</sub> = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,2</sub> = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo	f <sub>ck</sub> = 35 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub> = 3,2 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub> = 34077 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub> = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub> = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub> = 90,68 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 214,9 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	α <sub>e</sub> = 5,87 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	A <sub>s</sub> = 1257 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	A <sub>c,eff.1</sub> = 137500 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.2</sub> = 128367 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.3</sub> = 300000 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff.min</sub> = 128367 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>p,eff</sub> = 0,00979 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub> = 3,2 [MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub> = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	[ε <sub>sm</sub> -ε <sub>cm</sub> ] <sub>min</sub> = 0,000272 [-]
	[ε <sub>sm</sub> -ε <sub>cm</sub> ] <sub>calc.</sub> = -0,000240 [-]
	<b>[ε<sub>sm</sub>-ε<sub>cm</sub>] = 0,000272 [-]</b>
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	φ <sub>eq</sub> = 20,00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub> = 325 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub> = 0,800 [-] k <sub>2</sub> = 0,500 [-] k <sub>3</sub> = 3,400 [-] k <sub>4</sub> = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	s <sub>r,max.1</sub> = 534 [mm]
	s <sub>r,max.2</sub> = 501 [mm]
	<b>s<sub>r,max</sub> = 534 [mm]</b>
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>	
	w <sub>k,lim</sub> = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b>w<sub>k</sub> = 0,15 [mm]</b>

## Calotta – H = 60 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

#### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Rene sx</i>	2055	17
<i>Rene dx</i>	2073	23
<i>Chiave</i>	2031	-56



Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: \_\_\_\_\_

N° strati barre: 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	0	5,5
2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 0 2031 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -56 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord. [cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C25/30  
 $\epsilon_{su}$  67,5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3,5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  14,17 N/mm²  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  9,75 N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0,6  
 $\tau_{c1}$  1,829

$\sigma_c$  -4,318 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,1967 ‰

Verifica  
 N° iterazioni: 0

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

### 4.3 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
15 < z < 25	c'	[kPa]	120 – 150	150
	$\varphi'$	[°]	31 – 35	35
	E	[MPa]	100	100
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B2.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una condizione di copertura pari a 25 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

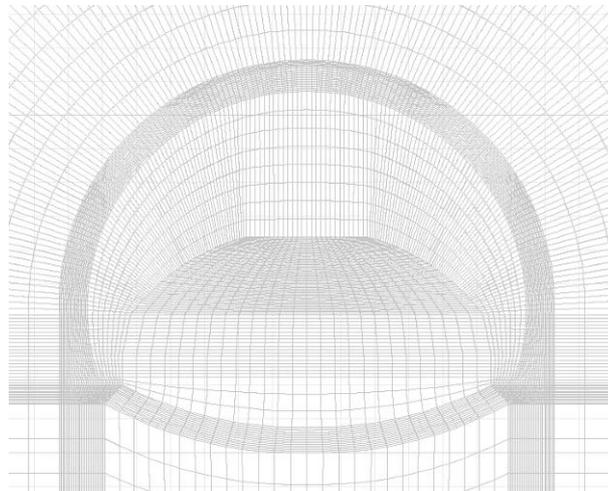
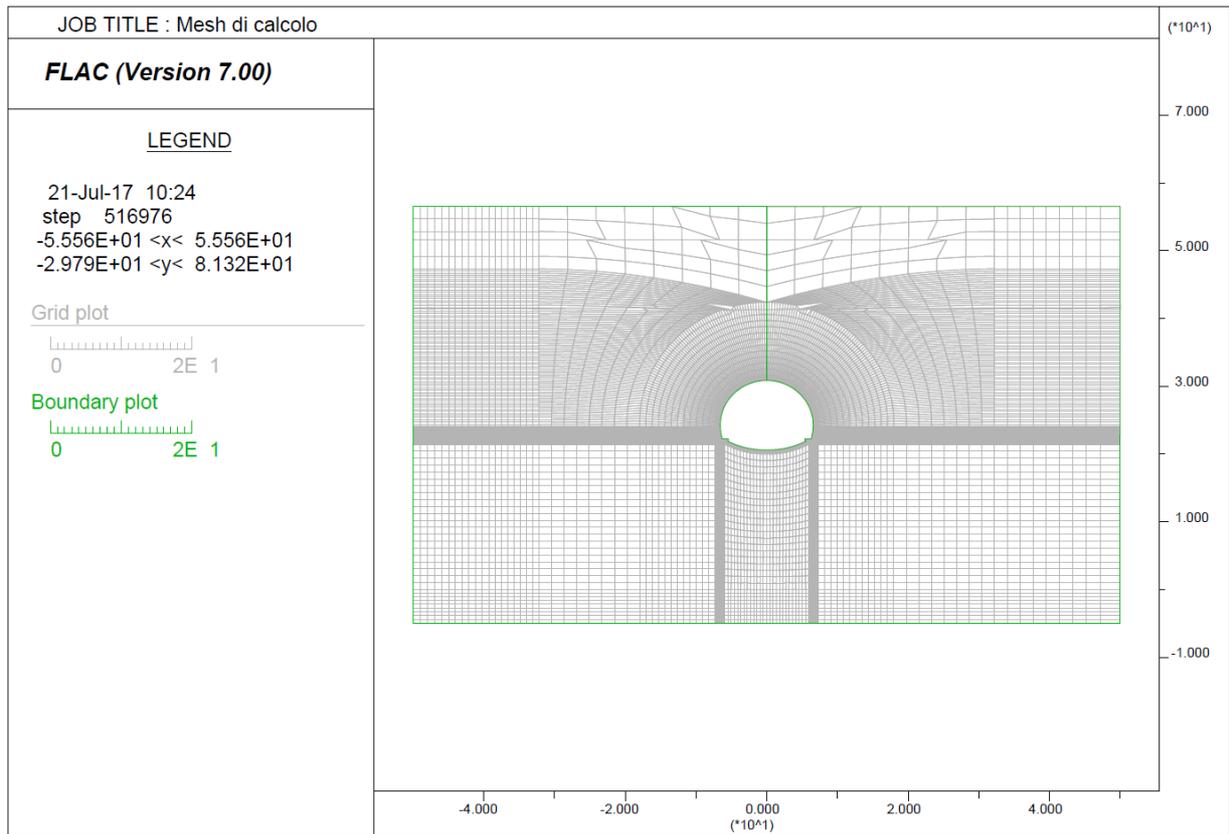
Il prerinvestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

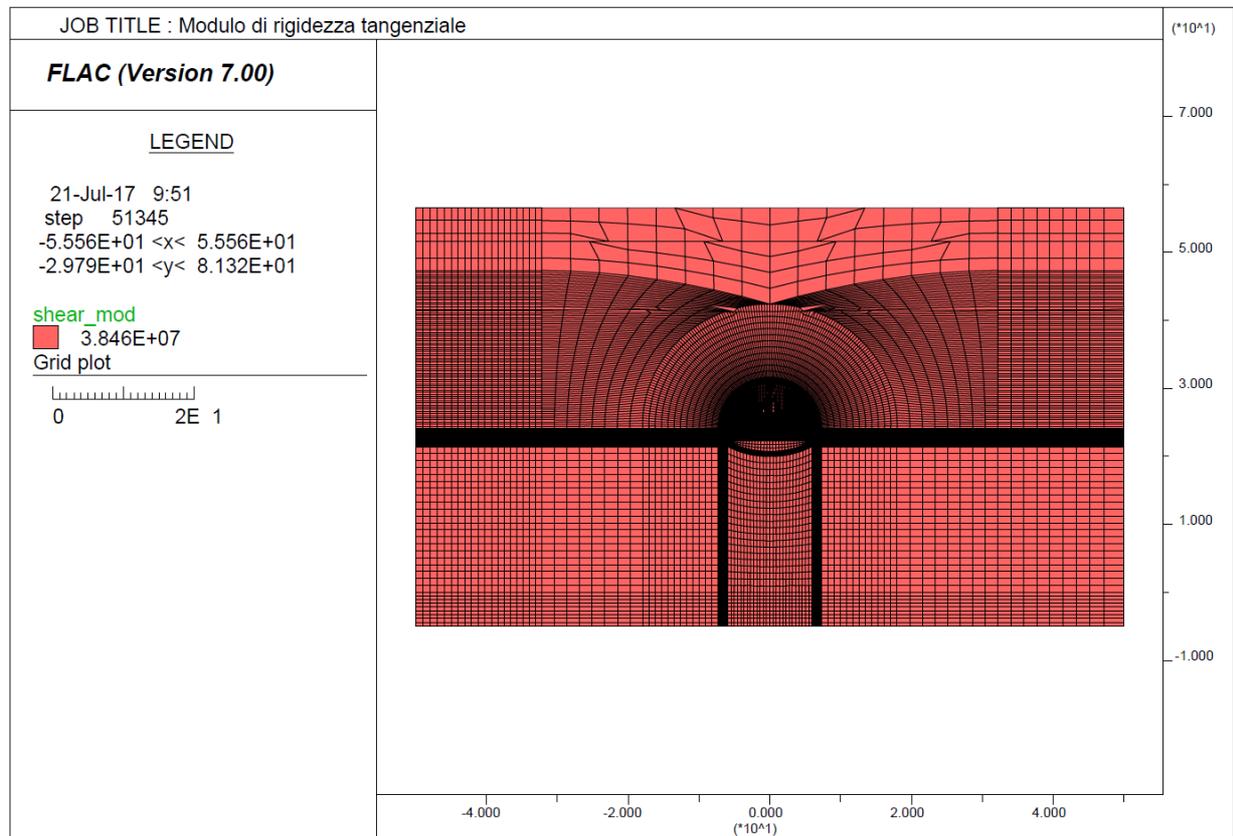
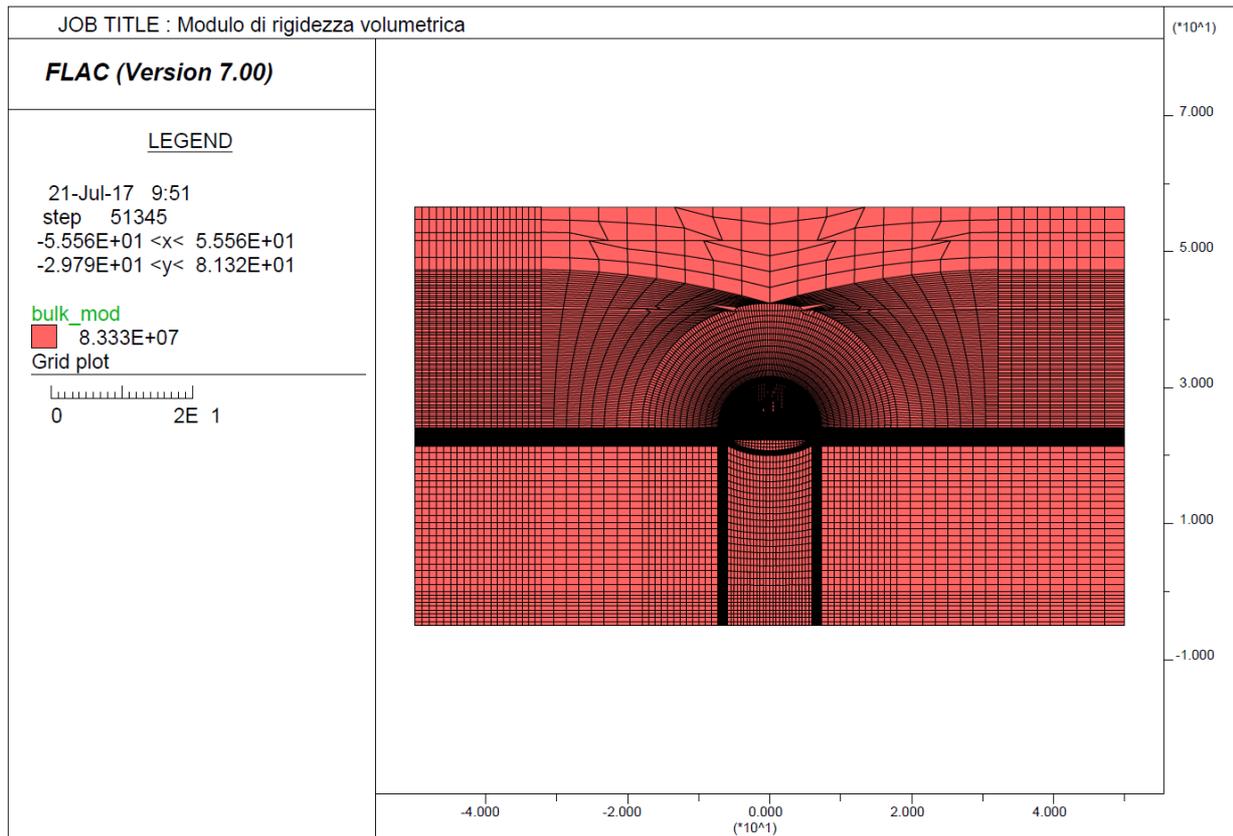
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

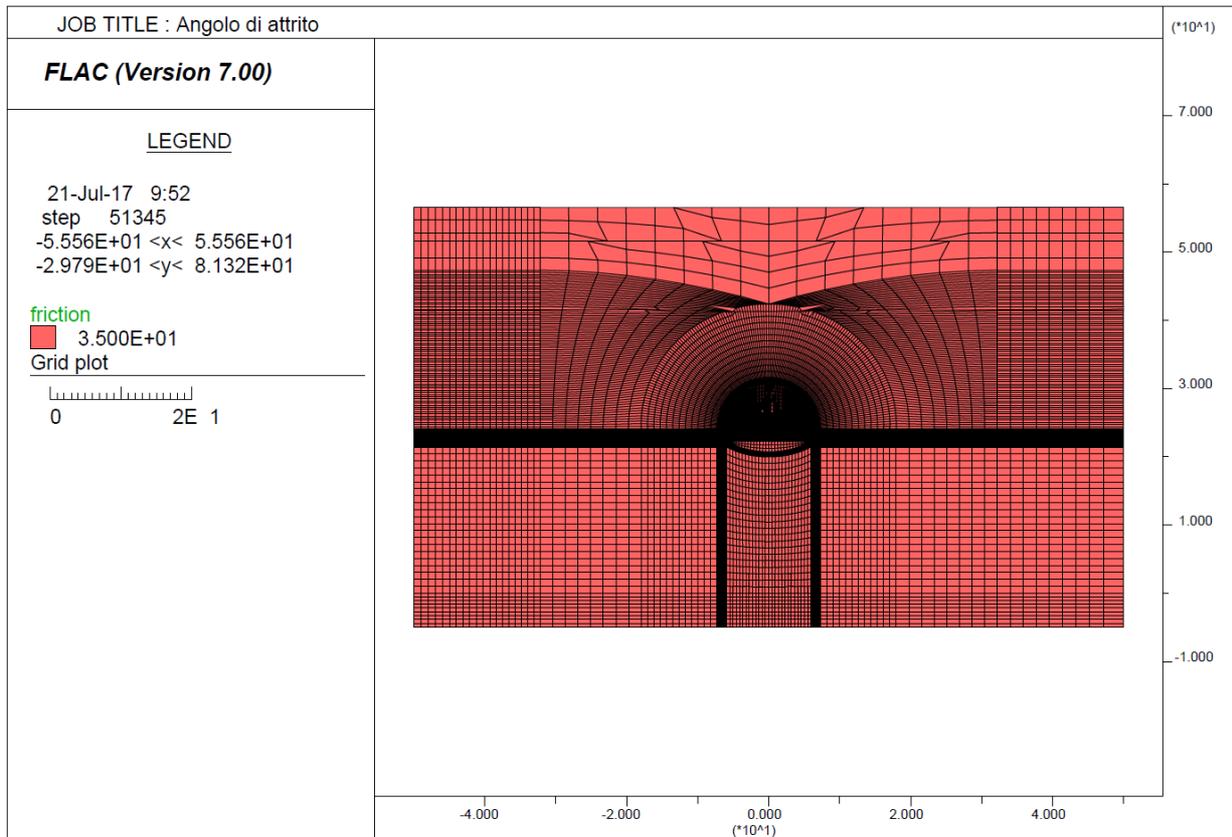
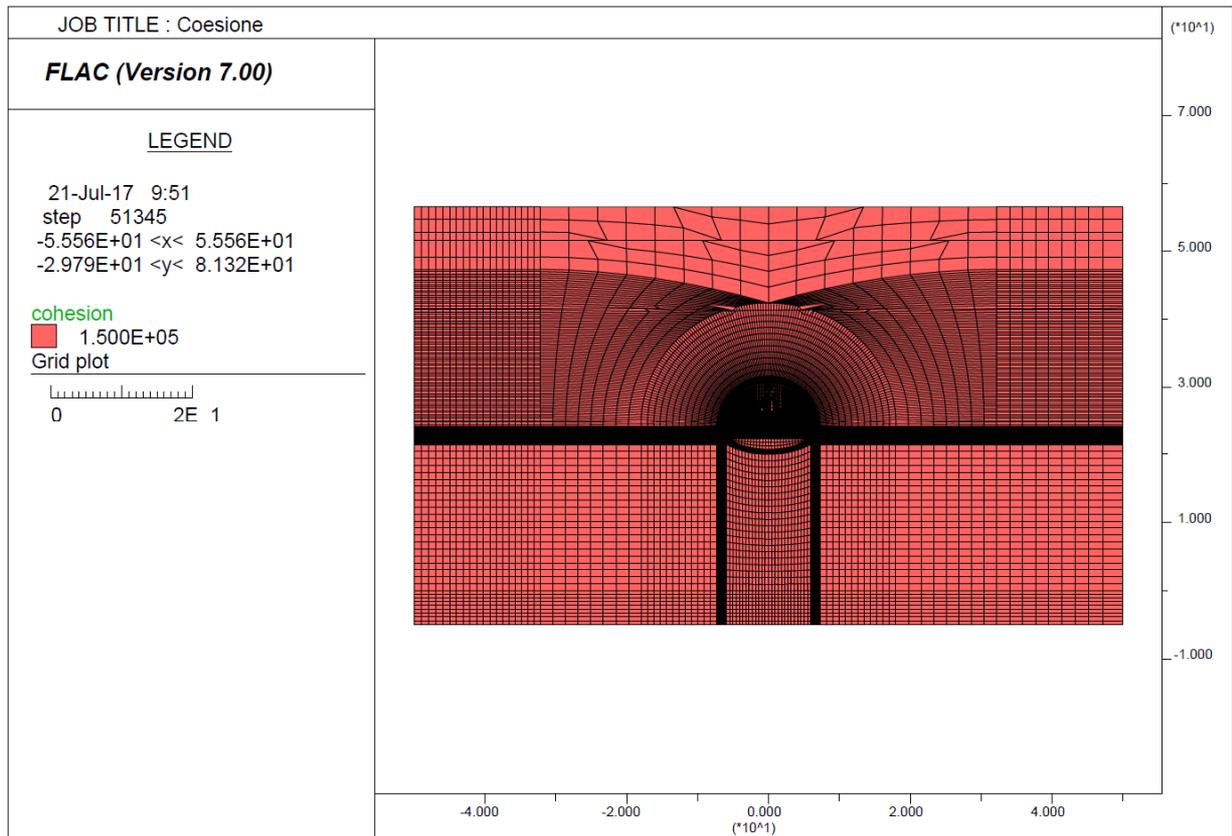
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

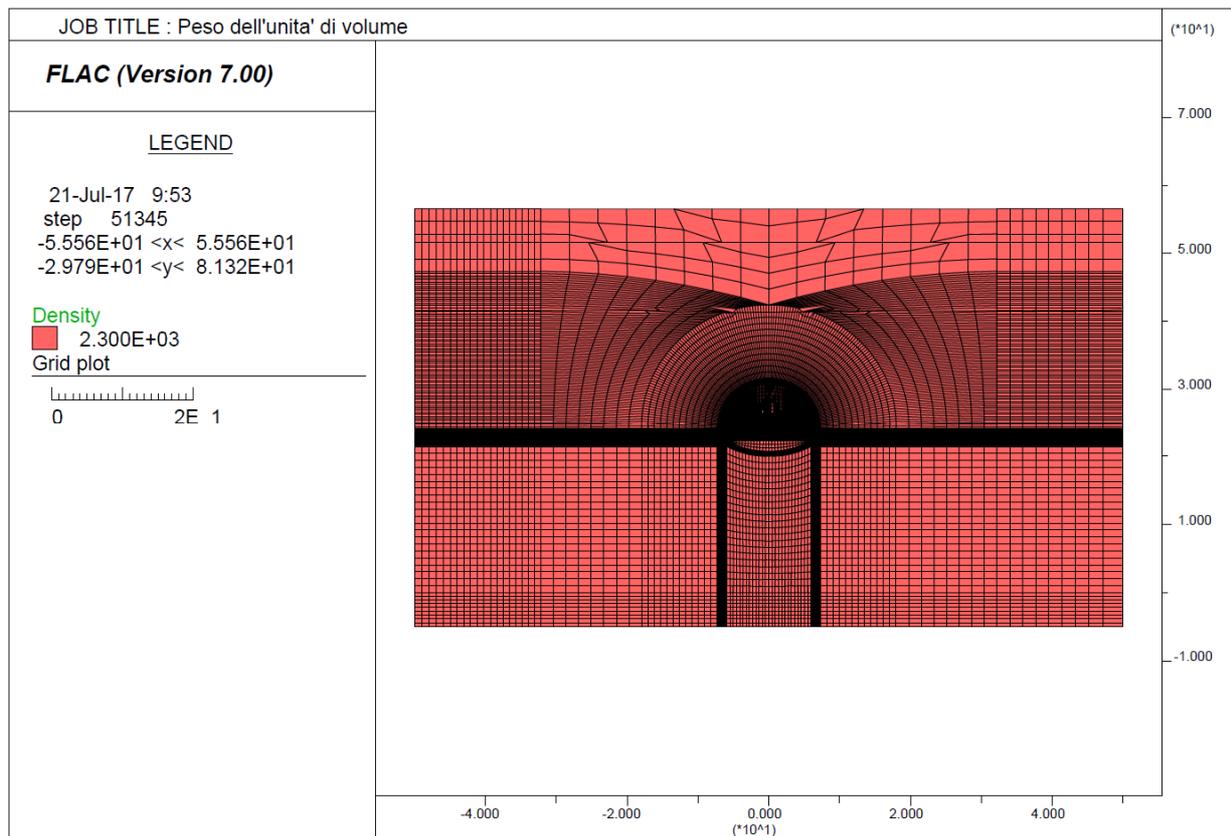
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo B2 - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	28,0%	0,36	-
Step 3	Scavo	1	37,9%	0,13*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	37,9%	0,13*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	77,0%	0,32*	0,19
Step 6	Avanzamento 2 D ( E SB = 31 Gpa)	29	91,4%	0,57*	0,44
Step 7	Getto arco rovescio e muretta a 2D e avanzamento fino a deformazioni esaurite	-	100,0%	-	0,44
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	0,44
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	0,44

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

### **4.3.1 Fasi di calcolo**

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il priverivestimento e per il rivestimento definitivo.

Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

Fase 1 In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

Fase 2 Questa fase consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo e, classicamente, per classi di copertura fino a 25 m è simulata attraverso l'adozione di un fattore di rilascio pari al 28 %.

Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.379)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 180 / 100) con spritz beton (20 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.379)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a  $\frac{1}{2}$  D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton ( $E = 10$  GPa) (fattore di rilascio = 0.770)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino a 2 D (fattore di rilascio = 0.914).

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio e l'avanzamento dello scavo fino all'esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1.00)

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

#### 4.3.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti

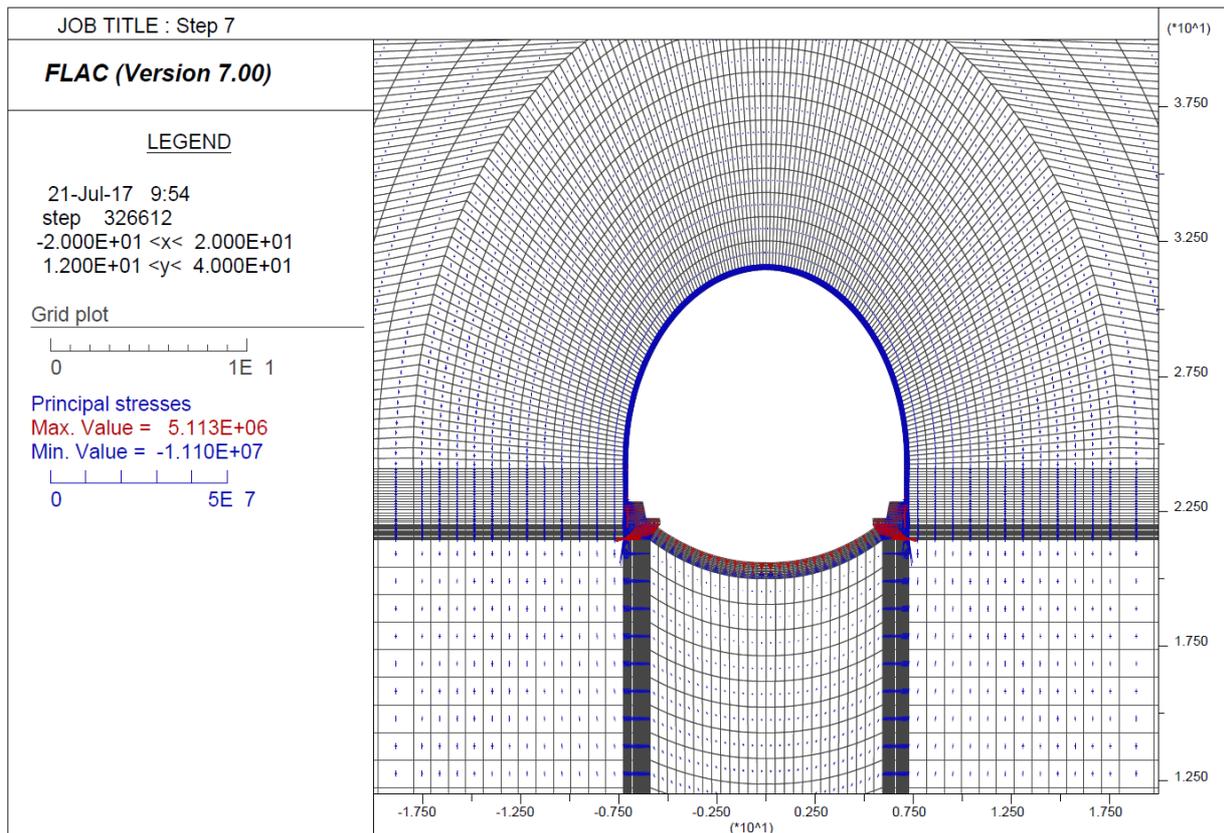
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

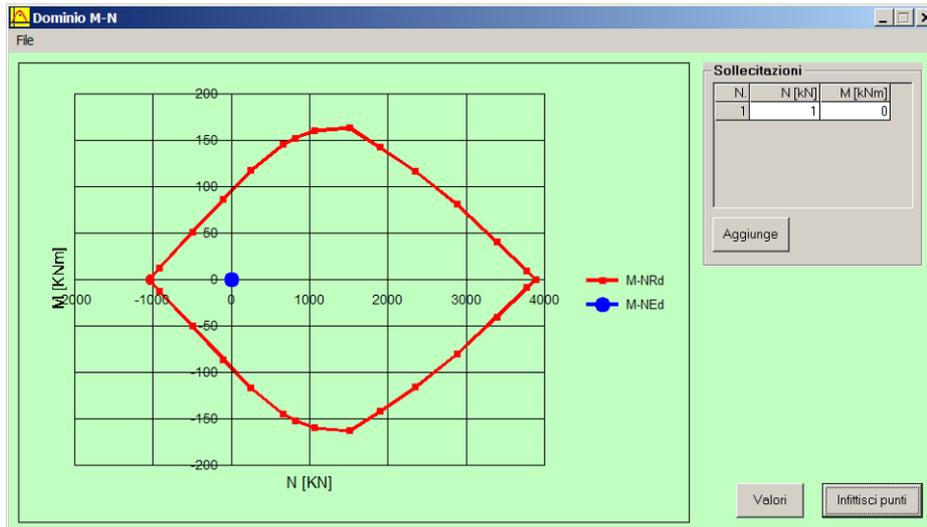
##### 4.3.1.1.1 Rivestimento di prima fase

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.

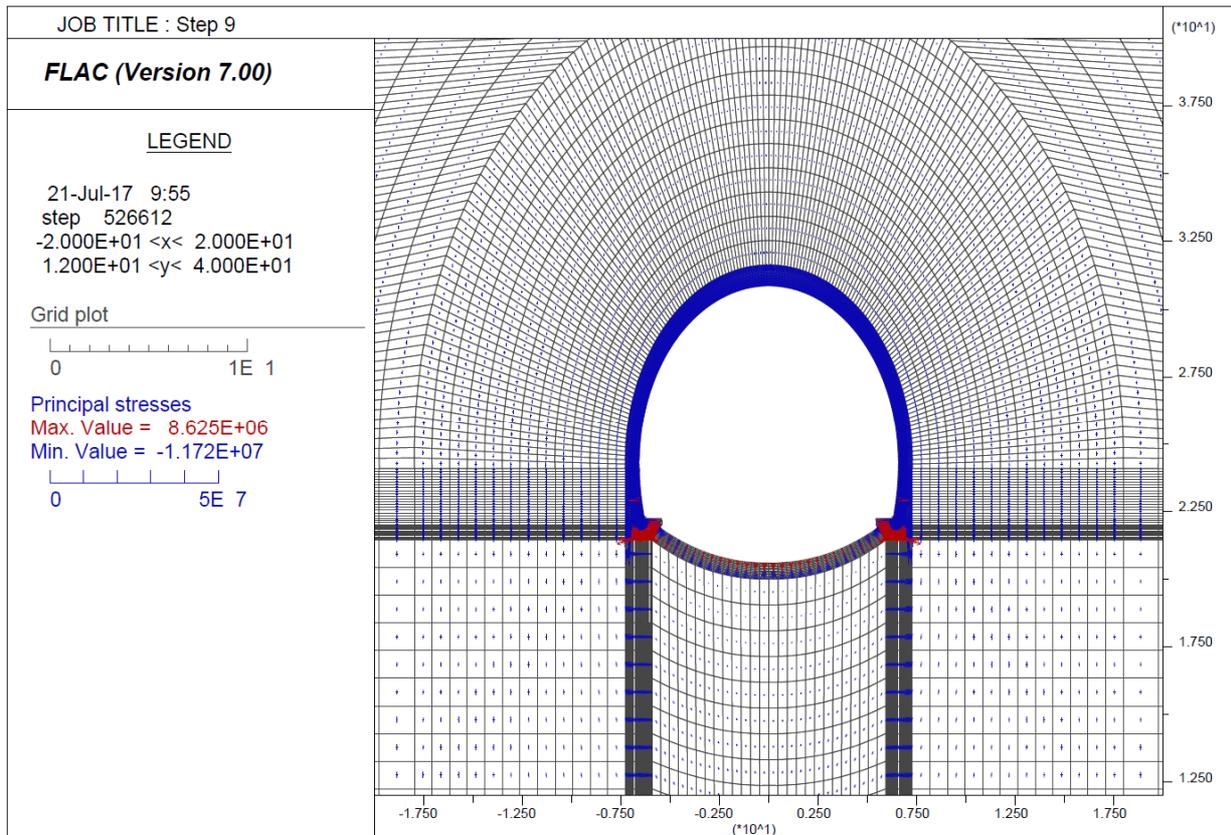






#### 4.3.1.1.2 Rivestimento definitivo

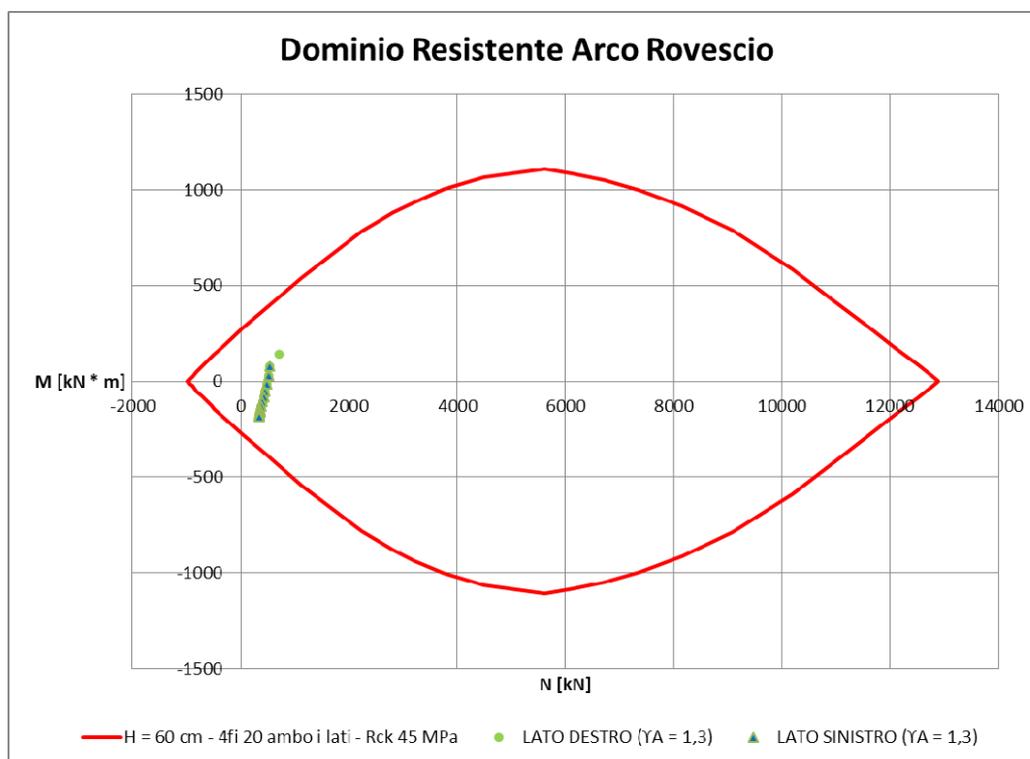
Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase). La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



## Arco rovescio - H = 60 cm

### Verifica SLU

#### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Stato limite di fessurazione

#### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	415	59
<i>Muretta dx</i>	417	60
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	268	-141

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ x

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo:

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	12,57	5,5
			2	12,57	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>   kN  
 M<sub>xEd</sub>   kNm  
 M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN  yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	<input type="text" value="67.5"/> ‰	$\epsilon_{c2}$	<input type="text" value="2"/> ‰
$f_{yd}$	<input type="text" value="391.3"/> N/mm²	$\epsilon_{cu}$	<input type="text" value="3.5"/> ‰
$E_s$	<input type="text" value="200.000"/> N/mm²	$f_{cd}$	<input type="text" value="19.83"/> ‰
$E_s/E_c$	<input type="text" value="15"/>	$f_{cc}/f_{cd}$	<input type="text" value="0.8"/> ?
$\epsilon_{syd}$	<input type="text" value="1.957"/> ‰	$C_{c,adm}$	<input type="text" value="13.5"/>
$C_{s,adm}$	<input type="text" value="255"/> N/mm²	$\tau_{co}$	<input type="text" value="0.8"/>
		$\tau_{cl}$	<input type="text" value="2.257"/>

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\sigma_s$   N/mm²

$\epsilon_s$   ‰  
 d  cm  
 x  x/d   
 $\delta$

Verifica

N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ x

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo:

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	12,57	5,5
			2	12,57	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>   kN  
 M<sub>xEd</sub>   kNm  
 M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN  yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	<input type="text" value="67.5"/> ‰	$\epsilon_{c2}$	<input type="text" value="2"/> ‰
$f_{yd}$	<input type="text" value="391.3"/> N/mm²	$\epsilon_{cu}$	<input type="text" value="3.5"/> ‰
$E_s$	<input type="text" value="200.000"/> N/mm²	$f_{cd}$	<input type="text" value="19.83"/> ‰
$E_s/E_c$	<input type="text" value="15"/>	$f_{cc}/f_{cd}$	<input type="text" value="0.8"/> ?
$\epsilon_{syd}$	<input type="text" value="1.957"/> ‰	$C_{c,adm}$	<input type="text" value="13.5"/>
$C_{s,adm}$	<input type="text" value="255"/> N/mm²	$\tau_{co}$	<input type="text" value="0.8"/>
		$\tau_{cl}$	<input type="text" value="2.257"/>

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\sigma_s$   N/mm²

$\epsilon_s$   ‰  
 d  cm  
 x  x/d   
 $\delta$

Verifica

N° iterazioni:

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	12,57	5,5
			2	12,57	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U. Metodo n  
 N<sub>Ed</sub> 0 268 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -141 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19.83  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8 ?  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13.5  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.8  
 $\tau_{ct}$  2.257

$\sigma_c$  -4.126 N/mm²  
 $\sigma_s$  125.4 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.6268 ‰  
 d 54.5 cm  
 x 18.01 x/d 0.3305  
 $\delta$  0.8531

Verifica  
 N° iterazioni: 5  
 Precompresso

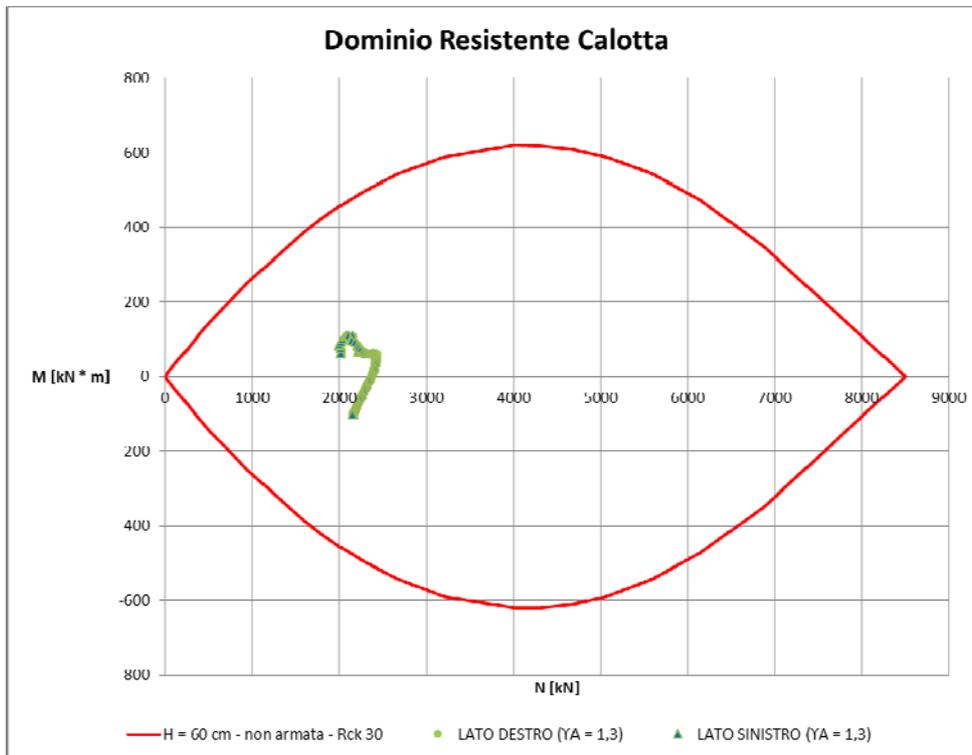
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione di mezzeria dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 600 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 545 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 545 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 55 [mm]
<a href="#">Armatura tesa ordinaria</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>r,1</sub> = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>r,1</sub> = 20 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,1</sub> = 1257 [mm <sup>2</sup> ]
<a href="#">Armatura tesa di infittimento</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>r,2</sub> = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>r,2</sub> = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,2</sub> = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	f <sub>ck</sub> = 35 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub> = 3,2 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub> = 34077 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub> = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub> = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub> = 125,4 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 180,1 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	α <sub>e</sub> = 5,87 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	A <sub>s</sub> = 1257 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	A <sub>c,eff,1</sub> = 137500 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff,2</sub> = 139967 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff,3</sub> = 300000 [mm <sup>2</sup> ] A <sub>c,eff,min</sub> = 137500 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	ρ <sub>p,eff</sub> = 0,00914 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	f <sub>ct,eff</sub> = 3,2 [MPa]
Fattore di durata del carico	k <sub>t</sub> = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	[ε <sub>sm</sub> -ε <sub>cm</sub> ] <sub>min</sub> = 0,000376 [-]
	[ε <sub>sm</sub> -ε <sub>cm</sub> ] <sub>calc.</sub> = -0,000113 [-]
	<b>[ε<sub>sm</sub>-ε<sub>cm</sub>] = 0,000376 [-]</b>
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	φ <sub>eq</sub> = 20,00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	s <sub>max,rif</sub> = 280 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	k <sub>1</sub> = 0,800 [-] k <sub>2</sub> = 0,500 [-] k <sub>3</sub> = 3,400 [-] k <sub>4</sub> = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	s <sub>r,max,1</sub> = 528 [mm]
	s <sub>r,max,2</sub> = 546 [mm]
	<b>s<sub>r,max</sub> = 528 [mm]</b>
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>	
	w <sub>k,lim</sub> = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b>w<sub>k</sub> = 0,20 [mm]</b>

## Calotta – H = 60 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Rene sx</i>	1860	28
<i>Rene dx</i>	1870	31
<i>Chiave</i>	1655	-78



Verifica C.A. S.L.U. - File

File Material Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	0	5,5
			2	0	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N Ed 0 1655 kN  
 M xEd 0 -78 kNm  
 M yEd 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C25/30  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  14.17  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  9.75  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.6  
 $\tau_{c1}$  1.829

$\sigma_c$  -4.058 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0.1273 ‰

Verifica  
 N° iterazioni: 0

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.

## 5. VERIFICA SEZIONE TIPO - COPERTURA H < 15 M

Le formazioni incluse nella tratta di copertura tra 0 e 15 m sono:

- Formazione di Camerino (Associazione Pelitica Arenacea)
- Formazione dello Schlier

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2V	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
0 < z < 15	c'	[kPa]	50 – 60	50
	$\varphi'$	[°]	26 – 28	26
	E	[MPa]	100	100
	$\gamma$	[kN/mc]	23	23

### 5.1 Sezione tipo B2V

Nel seguito si riportano le verifiche effettuate per la sezione tipo B2V.

Si precisa che i calcoli sono stati effettuati in corrispondenza di una copertura pari a 15 m e adottando un modello costitutivo tipo Mohr – Coulomb.

I rivestimenti di prima fase e definitivo sono stati simulati mediante elementi tipo zone.

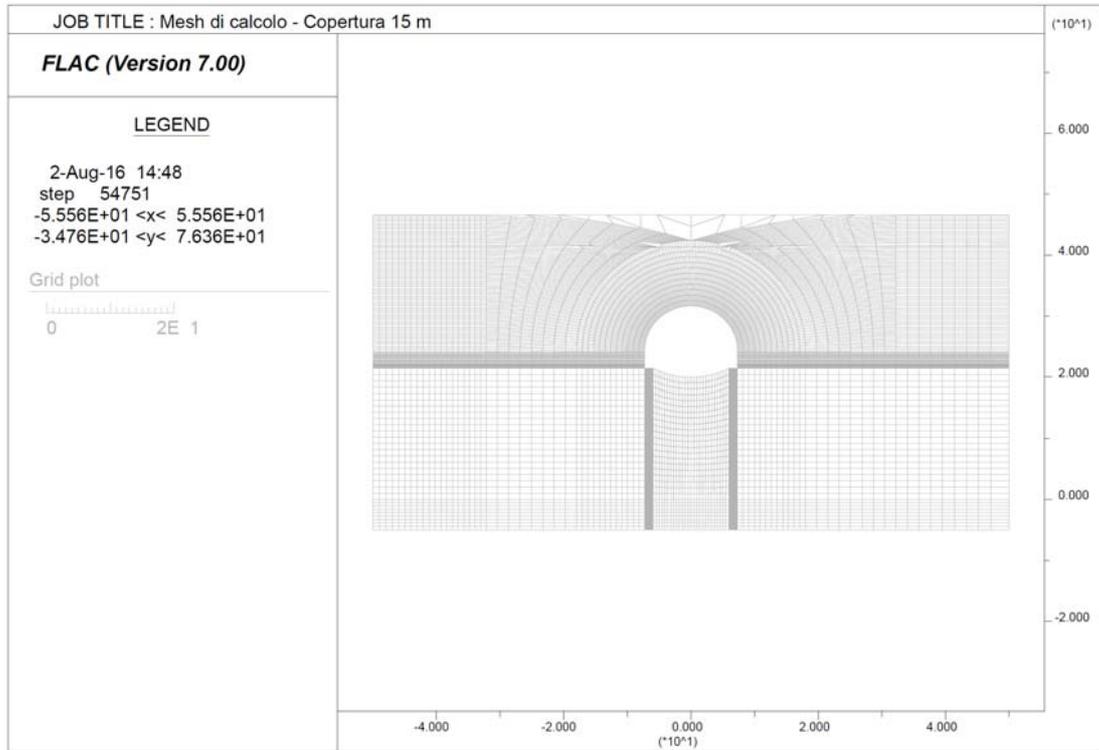
Il prerinvestimento, costituito da spritz-beton  $R_{ck} \geq 30$  MPa associato a centine di tipo IPN accoppiate, è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico-lineare, adottando i seguenti moduli elastici:

- centine  $E = 210.0$  GPa;
- spritz-beton (breve termine)  $E = 10.0$  GPa;
- spritz-beton (lungo termine)  $E = 31$  GPa.

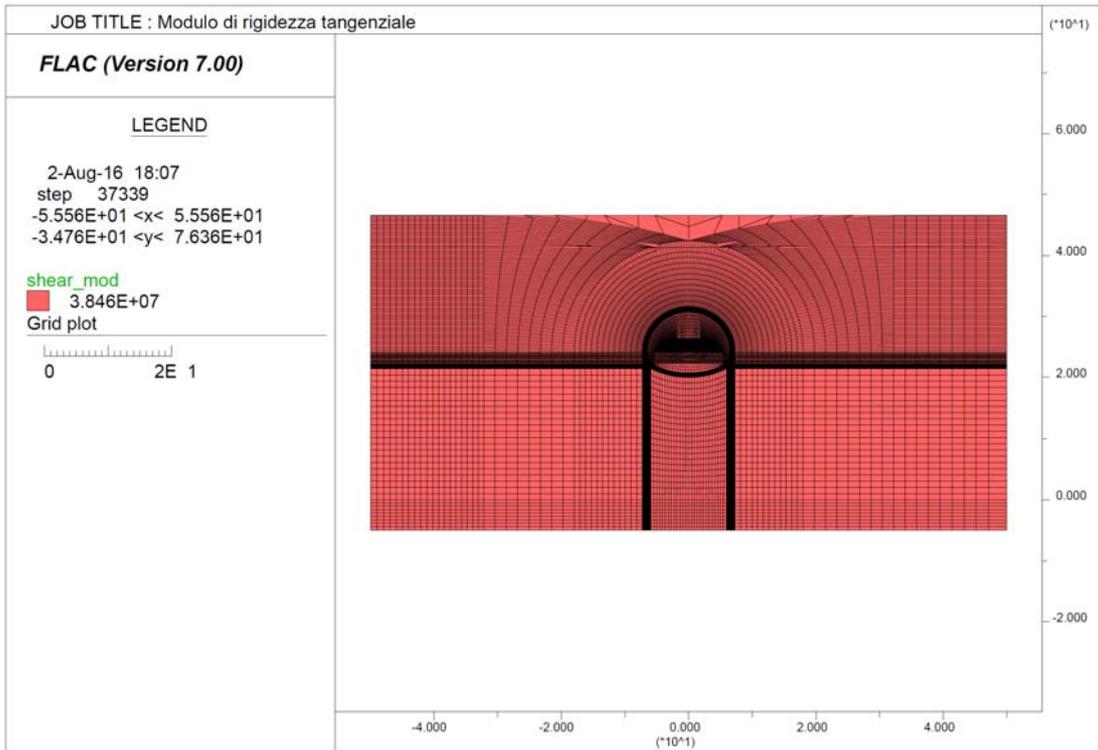
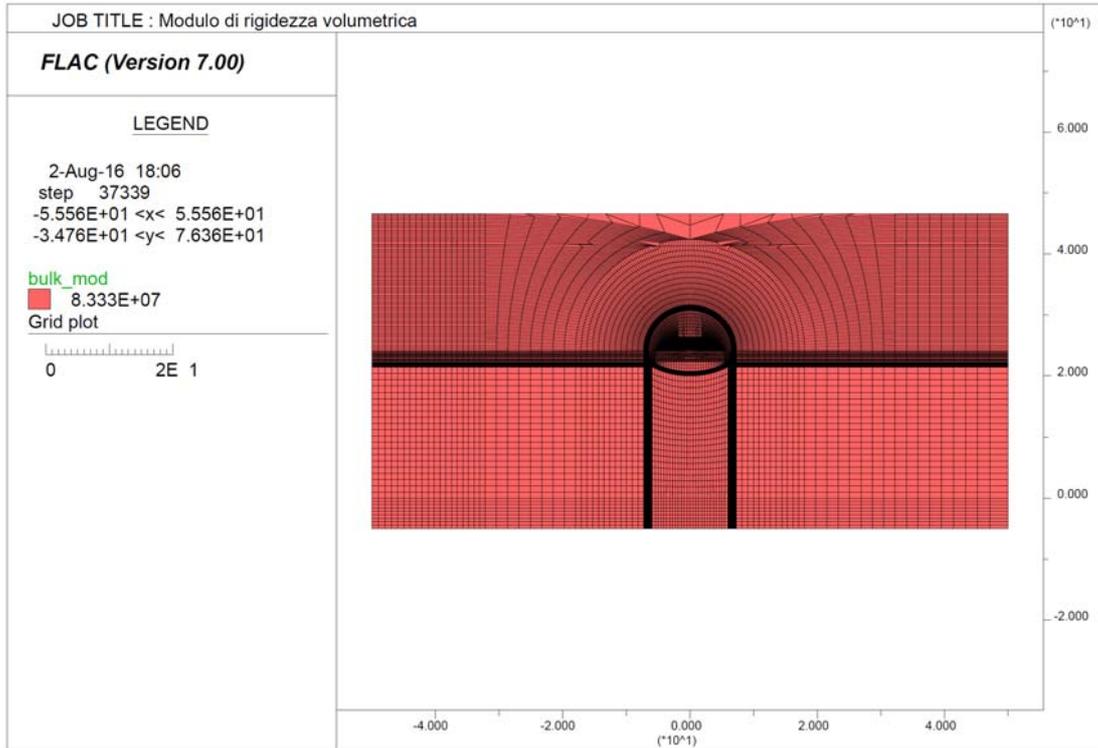
Il rivestimento definitivo di arco rovescio e murette è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 45$  MPa e modulo  $E = 35$  GPa.

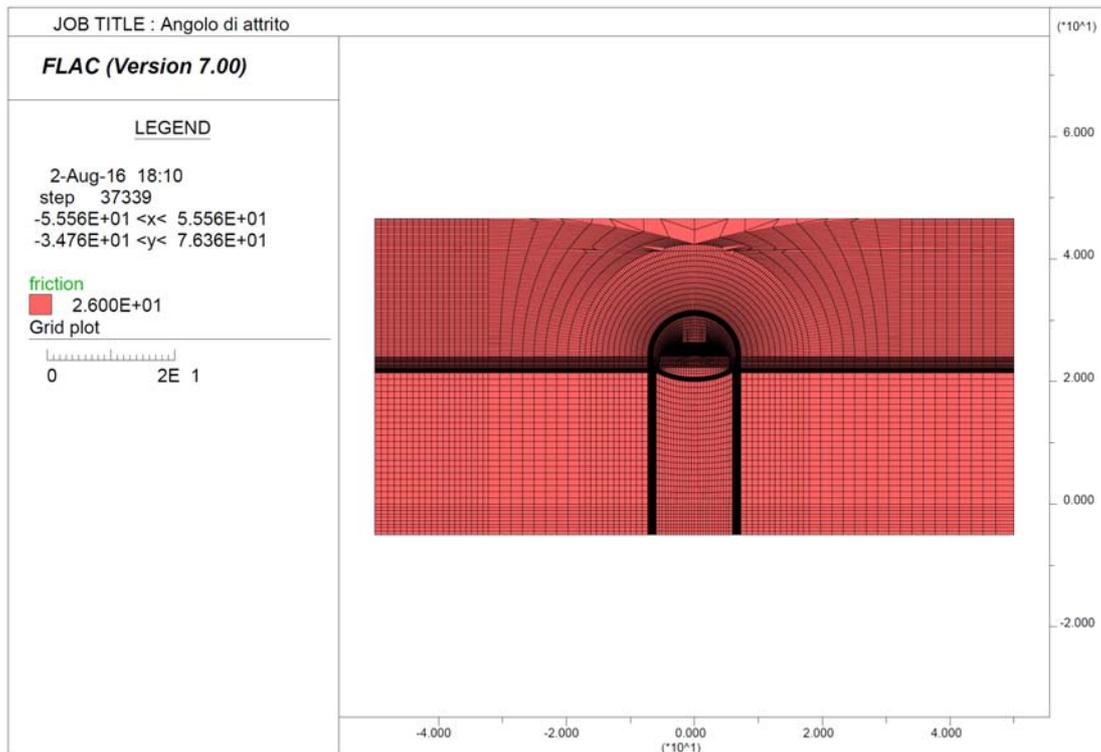
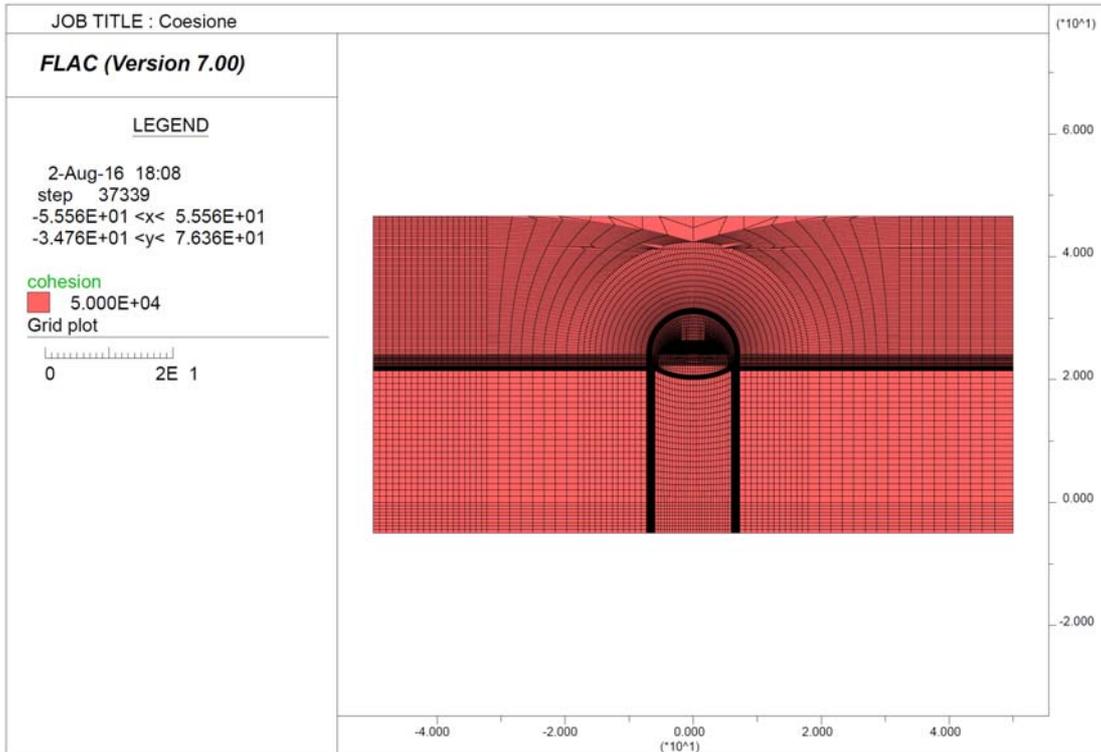
Il rivestimento definitivo di calotta è stato schematizzato come materiale a comportamento elastico -lineare assumendo un cls con  $R_{ck} \geq 30$  MPa e modulo  $E = 31$  GPa.

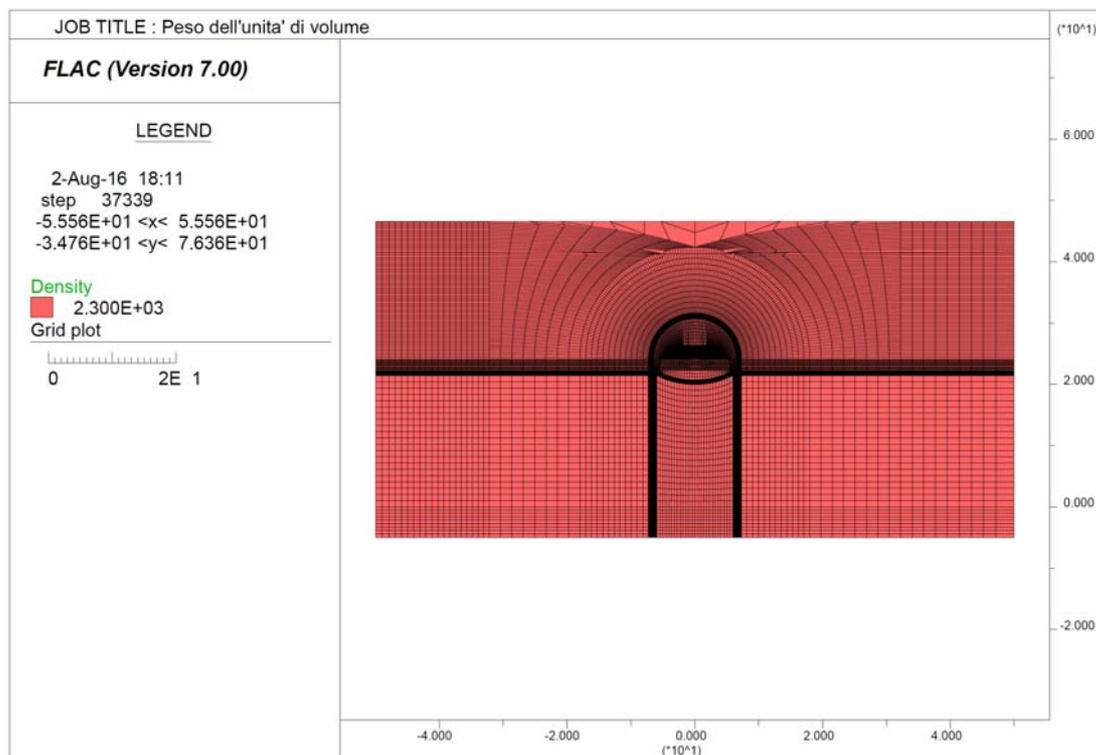
La mesh di calcolo utilizzata è riportata nella figura seguente.



Relativamente ai parametri di deformabilità ed al peso di unità di volume si riporta l'output delle assegnazioni al modello.







La tabella seguente riporta una sintesi delle fasi esecutive simulate nelle analisi riportate nel seguito ed un riepilogo degli spostamenti orizzontali registrati a quota Piano dei centri ai diversi step di calcolo.

*Sezione tipo B2V - Riepilogo della fasi di calcolo e degli spostamenti orizzontali a quota Piano dei centri*

Step	Fase esecutiva simulata	Distanza dal fronte [m]	Fattore di rilascio	Spostamento Parete Cavo dir orizz [cm]	Spostamento Piedritto Centina dir orizz [cm]
Step 1	Generazione tensioni litostatiche	-	0,0%	-	-
Step 2	Taratura	0	28,0%	0,97	-
Step 3	Scavo	1	37,9%	0,35*	-
Step 4	Posa in opera centina (SB non reagente)	1	37,9%	0,35*	0
Step 5	Avanzamento scavo ( E SB = 10 Gpa)	7	77,0%	1,47*	1,12
Step 6	Avanzamento 3 D( E SB = 31 Gpa)	43	94,3%	3,12*	2,76
Step 7	Getto arco rovescio e muretta a 3D e avanzamento fino a deformazioni esaurite	-	100,0%	-	2,76
Step 8	Getto Calotta	-	100,0%	-	2,76
Step 9	Decadimento dei parametri di resistenza del rivestimento provvisorio	-	100,0%	-	2,76

\* spostamento al netto della preconvergenza del fronte (step2 - taratura)

### **5.1.1 Fasi di calcolo**

Le analisi sono state organizzate in 9 successive fasi di calcolo che consentono la descrizione dei vari interventi costruttivi e la schematizzazione di diverse condizioni di carico per il priverivestimento e per il rivestimento definitivo.

Di seguito si elencano le fasi di calcolo considerate.

Fase 1 In questa prima fase di calcolo viene applicato il peso proprio del terreno; viene cioè ricostruito lo stato tensionale preesistente gli scavi.

Fase 2 Questa fase consente di simulare la preconvergenza del cavo prima dell'arrivo del fronte di scavo e, classicamente, per classi di copertura fino a 25 m è simulata attraverso l'adozione di un fattore di rilascio pari al 28 %.

Fase 3 Viene simulato lo scavo a piena sezione per sfondi pari a 1.00 m propedeutico alla posa in opera della centina (fattore di rilascio pari a 0.379)

Fase 4 Viene simulata la posa in opera della centina (2 IPN 200 / 100) con spritz beton (25 cm) non reagente (fattore di rilascio pari a 0.379)

Fase 5 Viene simulato l'avanzamento dello scavo fino a  $\frac{1}{2}$  D corrispondente alla situazione di parziale maturazione dello Spritz Beton ( $E = 10$  GPa) (fattore di rilascio = 0.770)

Fase 6 Viene simulato la completa maturazione dello Spritz beton e l'avanzamento dello scavo fino a 3D (fattore di rilascio = 0.943)

Fase 7 Viene simulato il getto delle murette e dell'arco rovescio a 3D e avanzamento fino ad esaurimento delle deformazioni (fattore di rilascio = 1)

Fase 8 Viene simulato il getto del rivestimento definitivo di calotta

Fase 9 Viene simulato il decadimento delle caratteristiche di resistenza del sistema di rivestimento provvisorio.

### 5.1.1.1 Verifiche statiche dei rivestimenti

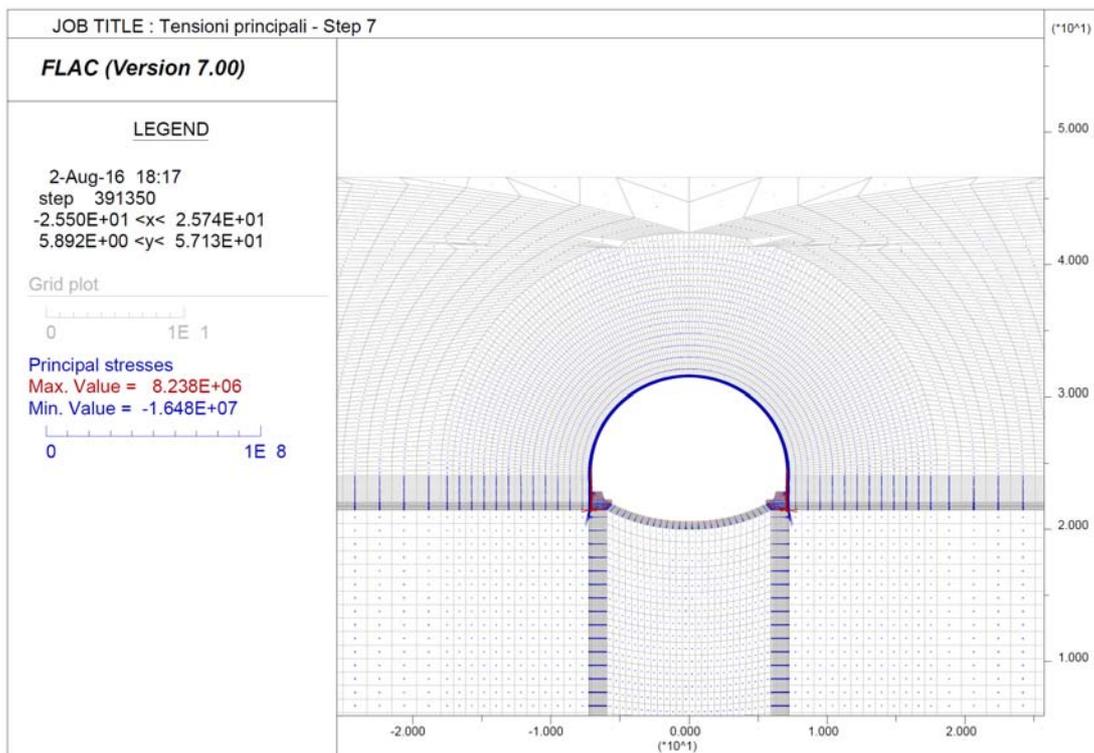
Le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi sono state eseguite in corrispondenza delle sezioni resistenti più sollecitate al termine delle fasi di calcolo ritenute più gravose.

Nel seguito sono riportati i diagrammi delle tensioni principali sulle zone rappresentative degli elementi resistenti.

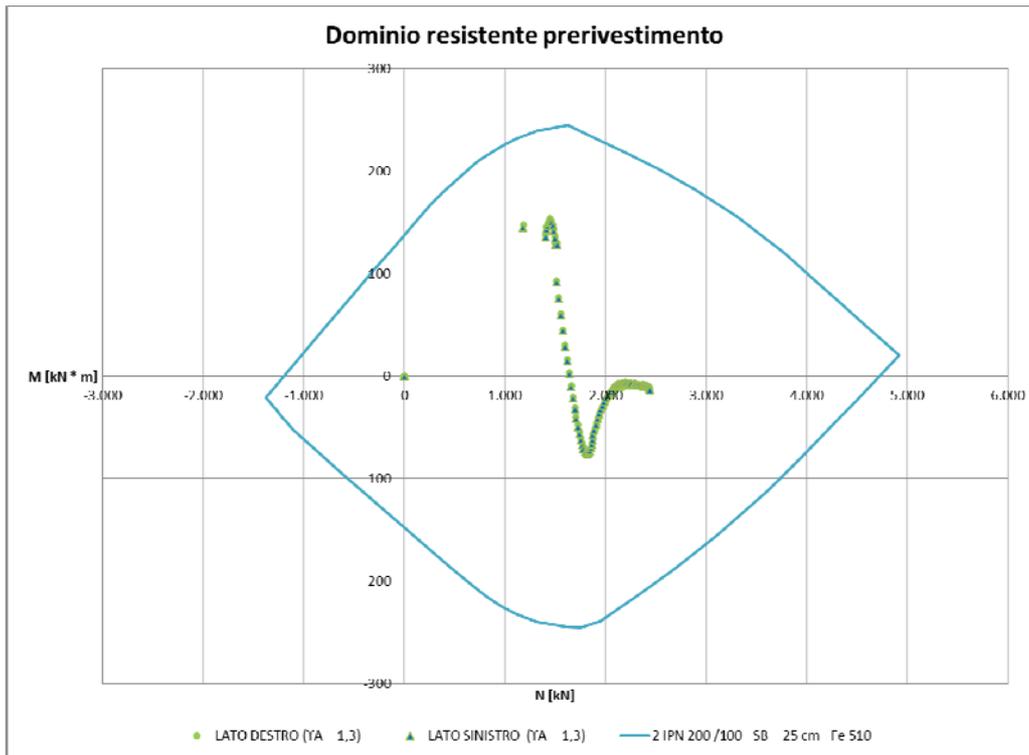
#### 5.1.1.1.1 Rivestimento di prima fase

Le verifiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte in corrispondenza della fase di calcolo 7 ritenuta quella più gravosa per l'elemento. Dalla fase successiva, infatti, si assiste al getto della calotta.

I diagrammi delle tensioni principali sono riportati nel seguito.



Nel seguito sono riportate le sollecitazioni agenti ed il dominio resistente della sezione omogeneizzata Centine e Spritz – beton prevista (2 IPN 200 / 100 – SB = 25 cm).



Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA Slu con il quale è stato creato il dominio resistente della sezione.

**Verifica CA. S.L.U. - File**

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	25	1	20,34	1
			2	20,34	21

**Sollecitazioni**

S.L.U.    Metodo n

N<sub>Ed</sub>  kN  
M<sub>xEd</sub>  kNm  
M<sub>yEd</sub>  kNm

**P.to applicazione N**

Centro     Baricentro cls  
 Coord.[cm]    xN   
yN

**Tipo rottura**

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

**Materiali**

Fe510	C25/30
$\epsilon_{su}$ 67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$ 2 ‰
$f_{yd}$ 338,1 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$ 3,5 ‰
$E_s$ 200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$ 14,17
$E_s/E_c$ 15	$f_{cc}/f_{cd}$ 0,8
$\epsilon_{syd}$ 1,691 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 9,75
$\sigma_{s,adm}$ 240 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$ 0,6
	$\tau_{c1}$ 1,829

**Metodo di calcolo**

S.L.U.+     S.L.U.-  
 Metodo n

**Tipo flessione**

Retta     Deviato

N° rett.

Calcola MRd    Dominio M-N

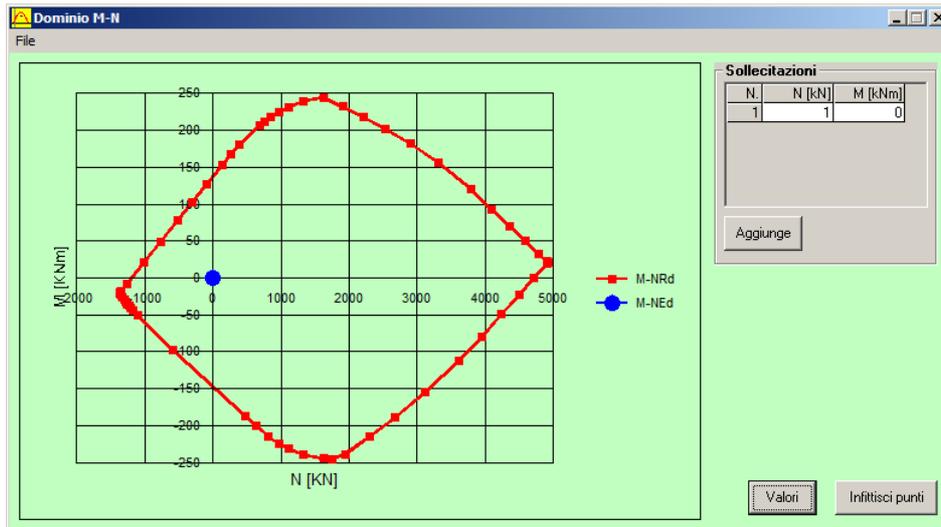
L<sub>0</sub>  cm    Col. modello

Precompresso

M<sub>xRd</sub>  kN m

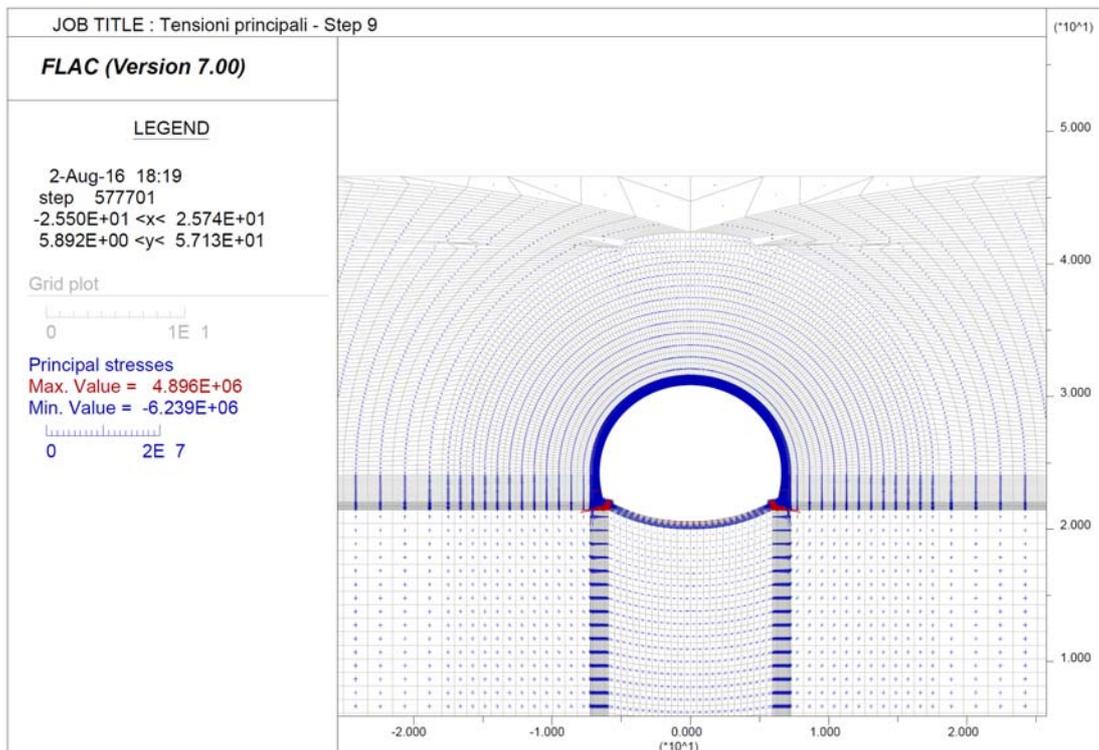
$\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_c$  3,5 ‰  
 $\epsilon_s$  43,71 ‰  
d 21 cm  
x 1,557    x/d 0,07414  
 $\delta$  0,7



### 5.1.1.1.2 Rivestimento definitivo

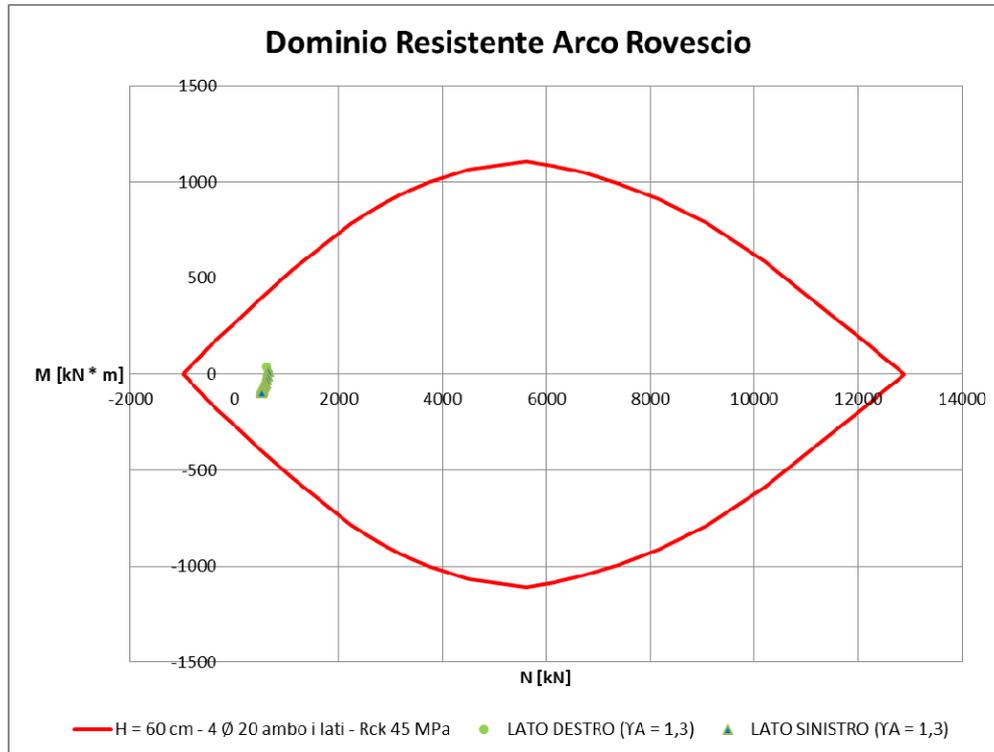
Le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte per le sollecitazioni agenti alla fase di calcolo 9 (decadimento delle caratteristiche di resistenza del rivestimento di prima fase). La figura seguente mostra le tensioni principali in corrispondenza di questo step di calcolo



## Arco rovescio - H = 60 cm

### Verifica SLU

#### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Stato limite di fessurazione

#### **Verifica nei confronti delle Punta tensionali**

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del punto di attacco muretta sx, della mezzeria dell'arco rovescio e del punto di attacco muretta dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Muretta sx</i>	501	9
<i>Muretta dx</i>	504	9
<i>Mezzeria Arco rovescio</i>	402	-75

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	12,57	5,5
2	12,57	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 501 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 9 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67,5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3,5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19,83  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13,5  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0,8  
 $\tau_{c1}$  2,257

$\sigma_c$  -0,9189 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,05076 ‰

Verifica N° iterazioni: 0

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	12,57	5,5
2	12,57	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 504 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 9 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C35/45  
 $\epsilon_{su}$  67,5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3,5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  19,83  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  13,5  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0,8  
 $\tau_{c1}$  2,257

$\sigma_c$  -0,9236 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,05111 ‰

Verifica N° iterazioni: 0

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: \_ \_ X

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	12,57	5,5
2	12,57	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>  402 kN  
 M<sub>xEd</sub>  -75 kNm  
 M<sub>yEd</sub>  0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali

B450C		C35/45	
$\epsilon_{su}$	67,5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391,3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3,5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	19,83
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0,8
$\epsilon_{syd}$	1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	13,5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0,8
		$\tau_{c1}$	2,257

$\sigma_c$  -1,924 N/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_s$  10,54 N/mm<sup>2</sup>

Verifica

N° iterazioni:

Precompresso

$\epsilon_s$  0,05268 ‰  
 d 54,5 cm  
 x 39,92 x/d 0,7325  
 $\delta$  1

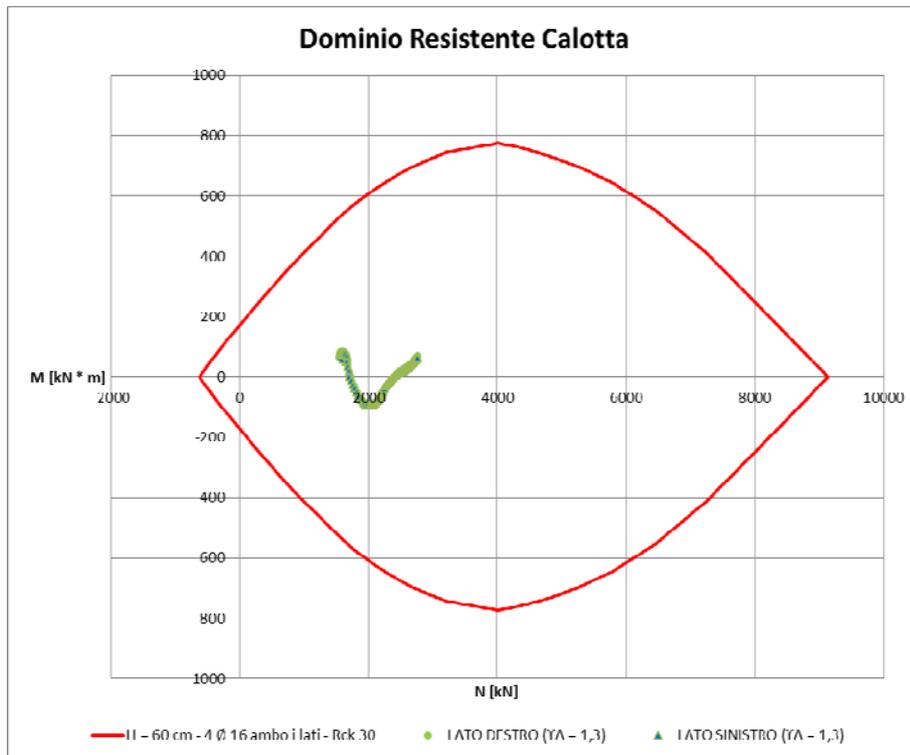
## Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Nel seguito è riportata la scheda relativa alla verifica a fessurazione effettuata per la sezione di mezzera dell'arco rovescio.

STATO LIMITE DI APERTURA DELLE FESSURE - Rif. UNI EN 1992-1-1: 2005 Par.7.3	
<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 600 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 545 [mm]
Distanza tra asse armatura e lembo compresso	d' = 55 [mm]
Ricoprimento dell'armatura	c = 47 [mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{r,1}$ = 4 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{r,1}$ = 20 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,1}$ = 1257 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{r,2}$ = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{r,2}$ = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,2}$ = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	$f_{ck}$ = 35 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	$f_{ctm}$ = 3,2 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	$E_{cm}$ = 34077 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$ = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	$E_s$ = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	$\sigma_s$ = 10,54 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 399,2 [mm]
Tipo e durata dei carichi applicati	Lunga
Coefficiente di omogeneizzazione	$\alpha_e$ = 5,87 [-]
Area totale delle armature presenti nella zona tesa	$A_s$ = 1257 [mm <sup>2</sup> ]
Area efficace tesa di calcestruzzo	$A_{c,eff.1}$ = 137500 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff.2}$ = 66933 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff.3}$ = 300000 [mm <sup>2</sup> ] $A_{c,eff.min}$ = 66933 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto tra l'area di acciaio teso e quella di calcestruzzo teso	$\rho_{p,eff}$ = 0,01877 [-]
Resistenza efficace media del calcestruzzo	$f_{ct,eff}$ = 3,2 [MPa]
Fattore di durata del carico	$k_t$ = 0,4 [-]
<b>Differenza tra la deformazione nell'acciaio e nel cls</b>	
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{min}$ = 0,000032 [-]
	$[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]_{calc.}$ = -0,000327 [-]
	<b><math>[\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}]</math> = 0,000032 [-]</b>
Spaziatura tra le barre (calcolata tra i baricentri dei ferri)	s = 250 [mm]
Diametro equivalente delle barre	$\phi_{eq}$ = 20,00 [mm]
Spaziatura massima di riferimento	$s_{max,rif}$ = 285 [mm]
Coefficienti k per il calcolo dell'ampiezza di fessurazione	$k_1$ = 0,800 [-] $k_2$ = 0,500 [-] $k_3$ = 3,400 [-] $k_4$ = 0,425 [-]
<b>Distanza massima tra le fessure</b>	
	$s_{r,max.1}$ = 341 [mm]
	$s_{r,max.2}$ = 261 [mm]
	<b><math>s_{r,max}</math> = 341 [mm]</b>
<b>Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente</b>	
	$w_{k,lim}$ = 0,20 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b><math>w_k</math> = 0,01 [mm]</b>

## Calotta – H = 60 cm

### Momento flettente



### Verifica SLE

Nel seguito sono descritte le verifiche allo SLE nei confronti di:

- Punta tensionali
- Apertura delle fessure

### ***Verifica nei confronti delle Punta tensionali***

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo per la verifica delle tensioni massime agenti in corrispondenza del rene sx, della chiave della calotta e del rene dx.

Le sollecitazioni di verifica sono:

<b>Elemento</b>	<b>N [kN]</b>	<b>M [kN * m]</b>
<i>Rene sx</i>	1723	-29
<i>Rene dx</i>	1737	-30
<i>Chiave</i>	2107	48

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30\_4fi16

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	8,04	5,5
2	8,04	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 1723 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -29 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C25/30  
 $\epsilon_{su}$  67,5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3,5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  14,17 ‰  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8 ?  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 ‰  $G_{c,adm}$  9,75  
 $G_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0,6  
 $\tau_{c1}$  1,829

$\sigma_c$  -3,208 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,1797 ‰

Verifica N° iterazioni: 0

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30\_4fi16

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

N°	As [cm²]	d [cm]
1	8,04	5,5
2	8,04	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 1737 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 -30 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
 B450C C25/30  
 $\epsilon_{su}$  67,5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3,5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm²  $f_{cd}$  14,17 ‰  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8 ?  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 ‰  $G_{c,adm}$  9,75  
 $G_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0,6  
 $\tau_{c1}$  1,829

$\sigma_c$  -3,246 N/mm²  
 $\epsilon_s$  -0,1804 ‰

Verifica N° iterazioni: 0

Precompresso

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal\_60\_rck30\_4fi16

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : \_\_\_\_\_

N° figure elementari 1 Zoom N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	8,04	5,5
			2	8,04	54,5

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

Solettezioni  
 S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub> 1 2107 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 48 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 0

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Materiali  
B450C C25/30  
 $\epsilon_{su}$  67,5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391,3 N/mm<sup>2</sup>  $\epsilon_{cu}$  3,5 ‰  
 $E_s$  200.000 N/mm<sup>2</sup>  $f_{cd}$  14,17 ‰  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0,8  
 $\epsilon_{syd}$  1,957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  9,75  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm<sup>2</sup>  $\tau_{co}$  0,6  
 $\tau_{c1}$  1,829

$\sigma_c$  -4,116 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_s$  -0,2078 ‰

Verifica  
N° iterazioni: 0

Precompresso

### Verifica nei confronti dell'apertura delle fessure

Relativamente alla verifica a fessurazione si segnala che, essendo la sezione interamente compressa, la verifica è soddisfatta nei confronti del limite imposto sulla decompressione della sezione.