

POLITECNICO DI TORINO
**DITAG - Dipartimento di Ingegneria del Territorio,
dell'Ambiente e delle Geotecnologie**

CAMPO DI SERGNANO

**STUDIO GEOMECCANICO DELLE CONDIZIONI
TENSO-DEFORMATIVE DELLA ROCCIA
SERBATOIO E DELLA
*CAP-ROCK***

Autore: Prof. P. Oreste

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA.....	5
3	METODO NUMERICO UTILIZZATO	7
4	SIMULAZIONE NUMERICA DEI CICLI DI STOCCAGGIO.....	9
4.1	GEOMETRIA DELLE SEZIONI DI STUDIO	9
4.2	DESCRIZIONE DEL PROCEDIMENTO DI CALCOLO	12
4.3	ANALISI DEI RISULTATI DELLO STUDIO DISACCOPPIATO.....	13
4.3.1	<i>Condizione 1 - Condizione iniziale, con pressione nel gas pari a $p_i = 15,4$ MPa</i>	13
4.3.2	<i>Condizione 2 – Condizione al termine della produzione primaria ($p_{min} = 6,94$ MPa)</i>	18
4.3.3	<i>Condizione 3 – Condizione di stoccaggio del gas con pressione pari al 110% della pressione iniziale ($p_{110\%} = 16,98$ MPa)</i>	22
4.3.4	<i>Condizione 4 – Condizione di stoccaggio del gas con pressione pari al 120% della pressione iniziale ($p_{120\%} = 18,52$ MPa)</i>	27
4.3.5	<i>Condizione 5 – Condizione di stoccaggio del gas con pressione pari al 130% della pressione iniziale ($p_{130\%} = 20,72$ MPa)</i>	32
5	CONCLUSIONI	37

1 INTRODUZIONE

Lo studio geomeccanico ha avuto lo scopo di individuare le condizioni tensionali e deformative che si realizzano nel giacimento di stoccaggio di Sergnano e nella sovrastante cap rock, in relazione a differenti pressioni di esercizio.

Dopo aver caratterizzato dal punto di vista geomeccanico i litotipi presenti, sono stati messi a punto tre modelli numeriche 2D in grado di studiare nel dettaglio i diversi aspetti del problema. Lo studio è stato condotto secondo un approccio di tipo disaccoppiato e si sono analizzate quattro sezioni ritenute rappresentative del giacimento (fig. 1), di cui una in direzione longitudinale (A – A') e tre in direzione trasversale (B – B', C – C', D – D').

Di particolare interesse è l'analisi del comportamento delle rocce in condizioni di pressione di esercizio pari al 110% (ovvero 16,98 MPa), 120% (ovvero 18,52 MPa) e 130% (ovvero 20,72 MPa) rispetto alla pressione di scoperta del giacimento. Dal calcolo è stato possibile prevedere le tensioni e le deformazioni nella roccia-serbatoio e soprattutto nella cap rock in corrispondenza del valore delle pressioni di esercizio massime previste e, quindi, valutare le condizioni di sicurezza nei riguardi della rottura per fessurazione della cap rock e della stessa roccia serbatoio.

Le analisi numeriche sono state condotte prendendo in considerazione l'influenza della pressione interstiziale sulle condizioni tensionali delle rocce.

L'incertezza della caratterizzazione del materiale alla scala del problema è stata affrontata adottando parametri geomeccanici delle rocce conservativi, cioè posti ai limiti degli intervalli di variabilità ritenuti probabili e in grado di indurre condizioni tensionali più critiche (fattori di sicurezza minimi).

L'analisi numerica sviluppata ha permesso di considerare i tre fattori che influenzano la capacità di un giacimento di stoccaggio ad operare in sicurezza in condizioni di pressioni di esercizio superiori a quella iniziale (Gas Research Institute, 1998):

- le caratteristiche geomeccaniche della roccia serbatoio e della cap rock;
- lo stato tensionale litostatico nella roccia serbatoio e nella cap rock;
- le variazioni delle condizioni tensionali nel giacimento e al contorno di esso, durante i cicli di iniezione ed erogazione del gas.

Il Gas Research Institute (1998) ha messo a punto anche un protocollo progettuale che definisce nel dettaglio i passi da compiere per sviluppare una corretta analisi geomeccanica sulla pressione limite che è possibile raggiungere durante lo stoccaggio del gas:

- determinazione delle caratteristiche meccaniche della roccia serbatoio e della cap rock;
- determinazione dello stato tensionale litostatico nella roccia serbatoio e nella cap rock;
- stima della variabilità della pressione di fratturazione in funzione della quota e della pressione del gas in giacimento;
- analisi degli effetti tensionali indotti nel giacimento dai cicli di iniezione ed erogazione del gas attraverso analisi numerica;
- confronto tra le condizioni tensionali indotte nella roccia serbatoio e nella cap rock e la resistenza che manifestano i litotipi presenti alle particolari condizioni tensionali del sito; nel caso abbiano lo stesso ordine di grandezza, sono raccomandate ulteriori analisi di dettaglio e verifiche in sito.

Sovente, però, le caratteristiche meccaniche delle rocce presenti e lo stato tensionale litostatico è stimato sulla base di informazioni e indagini carenti o del tutto assenti. In questi casi

è necessario fare riferimento a correlazioni empiriche e a valutazioni in analogia con situazioni simili.

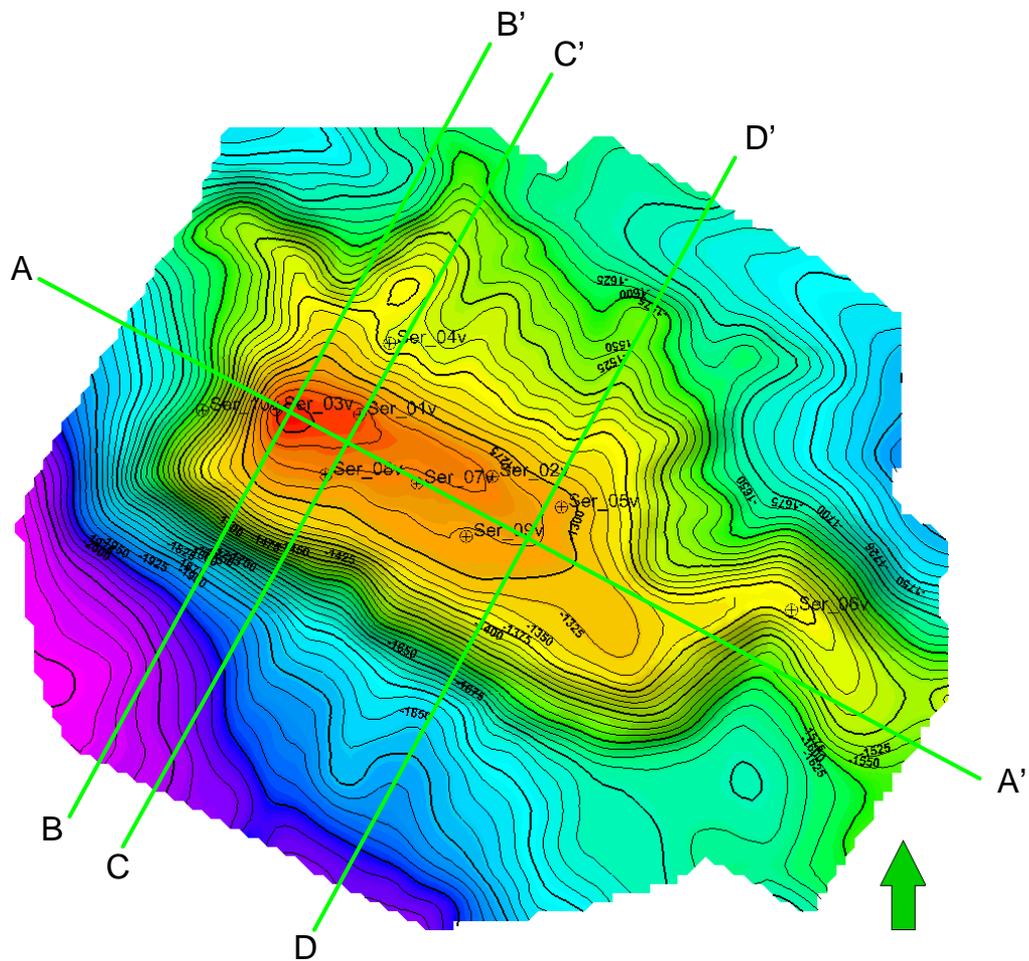
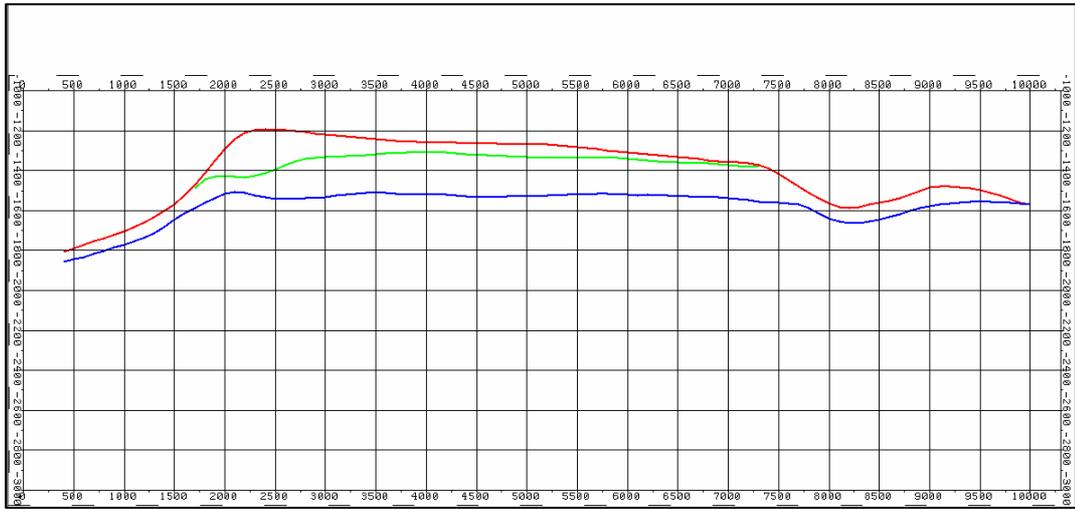
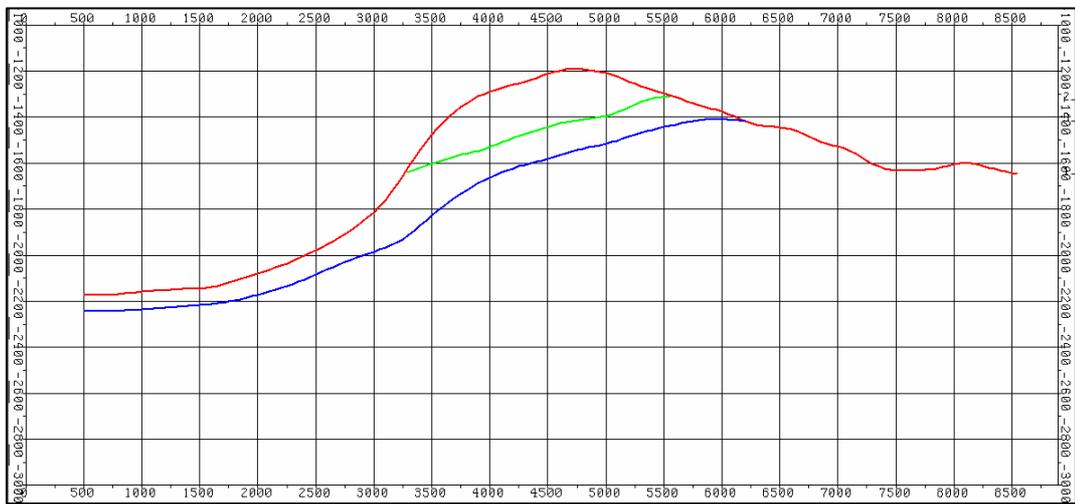


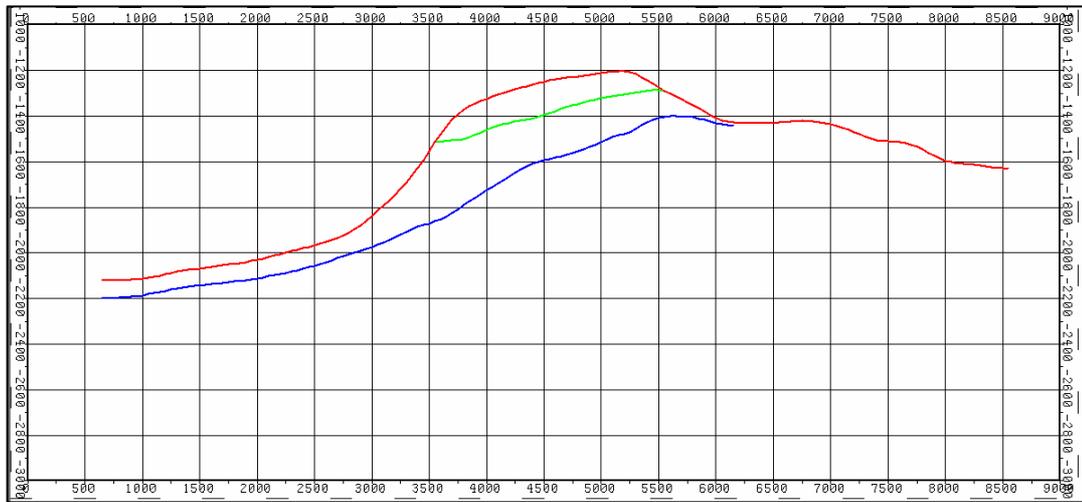
Fig. 1 - Rappresentazione delle sezioni analizzate sulla vista in pianta del giacimento



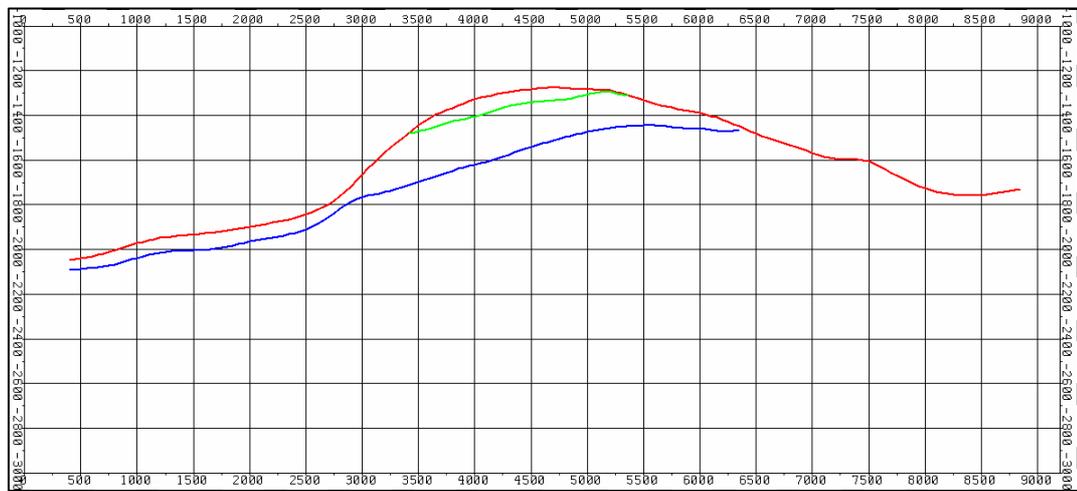
SEZIONE A – A'



SEZIONE B – B'



SEZIONE C – C'



SEZIONE D – D'

Fig. 2 - Sezioni del giacimento analizzate nel calcolo numerico: in colore rosso è indicato il contatto superiore tra cap-rock e roccia serbatoio, in colore blu il limite inferiore della roccia serbatoio

2 CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

Per operare valutazioni di tipo quantitativo sulla pressione limite che si può realizzare in condizioni di sicurezza in un giacimento di stoccaggio di gas, è necessario procedere ad un'affidabile caratterizzazione geomeccanica, alla scala del problema, dei litotipi presenti. Purtroppo, però, le indagini di laboratorio permettono di ricavare parametri geomeccanici della roccia alla piccola scala, che sovrastimano quelli alla grande scala. Alcune correlazioni empiriche sono in grado di tenere conto dell'effetto scala ed operare le necessarie correzioni dei parametri ottenuti in laboratorio. Le indagini geofisiche in foro, invece, offrono stime semi-quantitative dei parametri geomeccanici direttamente alla scala del problema. Esiste, comunque, sempre, nei problemi di questo tipo, una certa incertezza nella caratterizzazione geomeccanica delle rocce. Per questo motivo risulta essere molto utile definire intervalli di variabilità, ritenuti altamente probabili, dei diversi parametri geomeccanici, in modo da poter sviluppare successivamente analisi di tipo parametrico e una efficace back-analysis delle misure in sito disponibili.

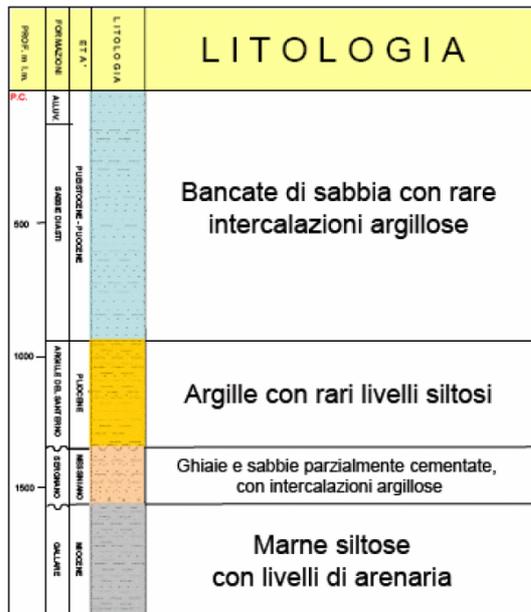


Fig. 3 - Schema stratigrafico (rapporto ENI, "Sergano 45 DIR. Caratterizzazione petrofisica, geostrutturale e geomeccanica. Estratto", 2/2008)

Dal punto di vista litologico, il giacimento di Sergnano è costituito in prevalenza da corpi conglomerati (Ghiaie di Sergnano); la copertura, o cap rock, è assicurata dai soprastanti livelli argillosi (Argille del Santerno); mentre la formazione basale è costituita da argille marnose con intercalazione di sabbia (fig. 3).

I modelli numerici generati hanno considerato due litotipi: quello relativo alla roccia serbatoio, ovvero "conglomerati", e il litotipo sovrastante relativo alla cap rock, ovvero "argille sommitali" (componente argillosa in senso stretto attorno al 40%, porosità effettiva media del 17%). Data la potenza rilevante della cap rock (in media 100 m), non si è ritenuto necessario modellizzare anche la formazione ad essa sovrastante.

Per la caratterizzazione geomeccanica della cap rock sono disponibili alcune prove di laboratorio di tipo triassiale condotte su campioni prelevati dal pozzo Sergnano 45dir a profondità diverse e comprese tra 1223,51 m e 1340,65 m (tab. 1 e 2 del “Test Report n. P30-00574/R30-00”).

Dall’analisi del log d’immagine FMI tale formazione è costituita da argille a banchi con spessore metrico, massive, solo localmente intercalate da livelli decimetrici siltoso-sabbiosi, laminati. La tessitura è essenzialmente omogenea. Le superfici di stratificazione sono comunque regolari e presentano immersione verso SSE (215 N) con inclinazioni blande di 1-2 gradi. Le prove triassiali effettuate sono del tipo CID, consolidate isotropicamente e drenate. La pressione di consolidazione è stata imposta pari a 2, 7,5, 10 e 20 MPa.

Dall’esame dei risultati forniti dalle prove triassiali sono stati desunti i parametri geomeccanici riportati nella tabella 1. I parametri di resistenza si riferiscono al criterio di rottura di Mohr-Coulomb; il modulo di deformazione è il modulo secante riferito ad uno sforzo deviatorico pari al 50 % di quello limite a rottura.

La resistenza a trazione è stata assunta pari a circa 2/3 della coesione.

Per quanto riguarda la roccia serbatoio, non essendo disponibili campioni prelevati in giacimento, si è fatto riferimento a dati disponibili relativi a situazioni simili e alla letteratura tecnico-scientifica (tabella 2). La roccia serbatoio è costituita in prevalenza dalla presenza di corpi conglomeratici, clasto-sostenuti che presentano un’organizzazione interna con strati laminati e gradati. La tessitura è eterogenea per la natura stessa dei clasti che costituiscono il sedimento. Le superfici di strato sono irregolari ma domina una immersione verso WNW (301 N) con inclinazione media di 11°.

Tab. 1: Parametri geomeccanici attribuiti al litotipo caratteristico della cap-rock, sulla base delle prove di laboratorio

Parametri geomeccanici	Valore
Modulo di deformazione E_d (Mpa)	500
Coesione c (MPa)	1,5
Angolo d'attrito Φ (°)	26
Resistenza a trazione σ_t (MPa)	1
Angolo di dilatanza Ψ (°)	-
Peso specifico (kN/m^3)	24,0

Tab. 2: Parametri geomeccanici attribuiti al litotipo caratteristico del reservoir, sulla base di analisi di letteratura

Parametri geomeccanici	Valore
Modulo di deformazione E_d (Mpa)	2000
Coesione c (MPa)	1,64
Angolo d'attrito Φ (°)	25
Resistenza a trazione σ_t (MPa)	1
Angolo di dilatanza Ψ (°)	-
Peso specifico (kN/m^3)	19,2

3 METODO NUMERICO UTILIZZATO

L'analisi tenso-deformativa della roccia-serbatoio e della cap rock durante i cicli carico-scarico è sviluppata attraverso la modellazione numerica del mezzo continuo equivalente. I metodi usati possono essere agli elementi finiti, alle differenze finite, agli elementi discreti o agli elementi di contorno. Nel seguito sarà impiegato il metodo alle differenze finite, particolarmente adatto ad analisi complesse di tipo accoppiato (tenso-deformativo e di flusso interstiziale) per materiali a comportamento elasto-plastico.

Il codice di calcolo utilizzato nel presente studio per la modellazione numerica è il *FLAC* (Fast Lagrangian Analysis of Continua) versione 4.

Il *FLAC* è un solutore esplicito alle differenze finite (FDM) (Cundall, 1976; Itasca Consulting Group, 1993; Itasca Consulting Group, 1994) che sviluppa analisi bidimensionali di tipo Lagrangiano su un continuo discretizzato in una maglia di elementi: ogni equazione differenziale che governa il problema in esame è descritta attraverso espressioni algebriche in termini di variabili di campo in punti discreti dello spazio. La natura esplicita del metodo consiste nel derivare, per un intervallo di tempo molto piccolo, le velocità e gli spostamenti note che siano le sollecitazioni e le forze agenti sul singolo elemento, le deformazioni nell'unità di tempo dalle velocità e, quindi, nuovamente, le sollecitazioni dalle deformazioni nell'unità di tempo (figura 4).

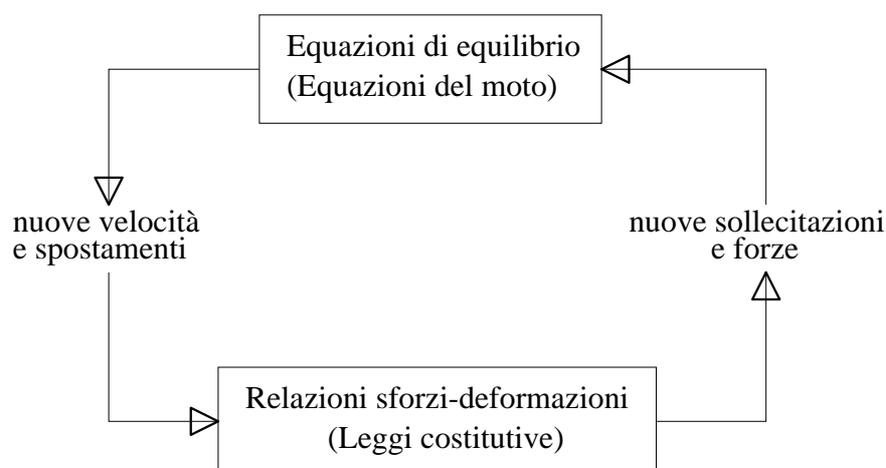


Fig. 4 - **Ciclo-base del calcolo esplicito con il FLAC (Fast Lagrangian Analysis of continua)**

Il *FLAC* analizza la meccanica del mezzo continuo attraverso un sistema di equazioni differenziali, che mette in relazione variabili fisiche (tensioni) e variabili cinematiche (velocità di deformazione, velocità), e che viene risolto per particolari geometrie e proprietà, date specifiche condizioni iniziali e al contorno.

Il metodo risolutivo adottato da *FLAC* è basato sui seguenti tre punti:

- approccio alle differenze finite (le derivate del primo ordine rispetto allo spazio e al tempo vengono approssimate con differenze finite assumendo una variazione lineare della variabile all'interno dell'intervallo dello spazio e del tempo);
- discretizzazione del modello (il mezzo continuo è sostituito da un discreto equivalente di elementi quadrilateri, in cui tutte le forze coinvolte sono concentrate ai nodi della maglia, usata per la rappresentazione del mezzo stesso);

- schema risolutivo dinamico (i termini inerziali delle equazioni del moto vengono utilizzati per la ricerca dello stato di equilibrio del sistema).

Nella formulazione Lagrangiana adottata, un punto del mezzo è caratterizzato dalle componenti dei vettori posizione x_i , spostamento u_i , velocità v_i e accelerazione dv_i/dt . Per definizione, trazione e deformazione di estensione sono considerate positive.

Le incognite del problema sono le tre componenti del tensore di sollecitazione, le due componenti del vettore velocità di deformazione e le due componenti del vettore velocità.

L'intervallo di tempo di ogni step di calcolo viene scelto automaticamente dal codice numerico così piccolo che le informazioni non abbiano il tempo di propagarsi agli elementi vicini (ogni materiale presenta una velocità finita con la quale si trasferiscono le informazioni relative allo stato tensionale e deformativo). Naturalmente dopo diversi cicli di calcolo i disturbi possono propagarsi agli altri elementi, allo stesso modo come accade nella realtà. Questo, dunque, rappresenta il concetto centrale dei sistemi espliciti: la velocità di propagazione del calcolo deve sempre restare maggiore della velocità di propagazione delle informazioni fisiche, in modo che le equazioni possano sempre operare su termini noti, che sono fissi per la durata del calcolo.

La condizione di stabilità per un solido elastico discretizzato in un elemento di dimensioni Δx è:

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{C}$$

dove: C: velocità massima alla quale si propaga l'informazione fisica, generalmente l'onda di compressione p (C_p):

$$C_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3} \cdot G}{\rho}}$$

Contrariamente al metodo degli elementi finiti (FEM), nel metodo alle differenze finite (FDM) le variabili di campo non vengono approssimate nel singolo elemento da funzioni specifiche definite a priori, ma la variazione dell'incognita nell'intervallo di tempo viene linearizzata; così pure si assume che la deformazione, e conseguentemente la sollecitazione, siano costanti all'interno di ogni elemento utilizzato per la discretizzazione spaziale; non è necessario, inoltre, definire la matrice di rigidezza globale del problema in esame.

Entrambi i metodi (degli elementi finiti e alle differenze finite di tipo esplicito) presentano le stesse equazioni risolutive, ma in forma diversa. L'approccio esplicito del FLAC comporta la soluzione di equazioni dinamiche sempre, anche quando il problema è chiaramente statico. Nei problemi in cui la legge costitutiva è non lineare, come per i problemi di geotecnica ed ingegneria delle rocce, invece, il FDM è molto competitivo, poichè, contrariamente al FEM, non sono richiesti lunghi e dispendiosi processi iterativi.

4 SIMULAZIONE NUMERICA DEI CICLI DI STOCCAGGIO

Le analisi del comportamento tenso-deformativo sono state effettuate in modo disaccoppiato, ed hanno analizzato le quattro sezioni rappresentative del giacimento con quattro diversi modelli numerici.

Si è scelto di condurre le simulazioni in campo elastico, poiché da analisi numeriche preliminari è risultato che sia la cap-rock sia la roccia serbatoio permangono in campo elastico durante i cicli di iniezione ed estrazione del gas. La determinazione del fattore di sicurezza è stata quindi eseguita successivamente al calcolo, confrontando lo stato tensionale determinato in campo elastico con l'involuppo a rottura secondo il criterio di Mohr-Coulomb (definito sulla base della coesione, dell'angolo d'attrito e della resistenza a trazione della roccia).

Lo studio ha reso necessario inizializzare le tensioni geostatiche e le pressioni neutre nei pori.

Le analisi condotte hanno consentito di simulare la risposta deformativa e tensionale del giacimento e della cap rock in relazione a cinque scenari che consentono di ripercorrere temporalmente l'evoluzione del campo durante la sua vita operativa:

1. pressione iniziale (15,4 MPa, ovvero 154 barsa): corrispondente alle condizioni indisturbate;
2. pressione minima (6,9 MPa, ovvero 69 barsa): corrispondente alla fine della fase di produzione primaria;
3. pressione di esercizio pari al 110% della p_i (16,98 MPa ovvero 169,8 barsa);
4. pressione di esercizio pari al 120% della p_i (18,52 MPa ovvero 185,2 barsa);
5. pressione di esercizio pari al 130% della p_i (20,72 MPa ovvero 207,2 barsa);

Ad ognuna delle cinque condizioni analizzate corrisponde una quota del contatto gas-acqua nella roccia serbatoio. Tale quota è stata ottenuta attraverso simulazioni numeriche dinamica di giacimento e/o da misure sul campo:

- condizione 1 ($p = p_i$): 1310 m s.l.m.;
- condizione 2 ($p = p_{\min}$): 1290 m s.l.m.;
- condizione 3 ($p = p_{110\%}$): 1293 m s.l.m.;
- condizione 4 ($p = p_{120\%}$): 1297 m s.l.m.;
- condizione 5 ($p = p_{130\%}$): 1300 m s.l.m.

Nella cap rock è stata assunta una pressione neutra costante nelle cinque diverse condizioni analizzate: la superficie della falda è stata considerata coincidente con la superficie del suolo e, quindi, il battente idraulico è stato posto uguale alla profondità.

4.1 GEOMETRIA DELLE SEZIONI DI STUDIO

I litotipi presi in considerazione sono i seguenti:

- roccia serbatoio ("conglomerati");
- roccia di copertura ("argille sommitali").

In ogni sezione considerata nel calcolo, la roccia serbatoio è limitato superiormente dalla cap rock: si è ipotizzato uno spessore della cap rock costante pari a circa 100 m.

Le sezioni di analisi sono state discretizzate in elementi rettangolari di dimension medie di circa 6 m x 3 m; nella tabella 3 sono indicate le dimensioni dei modelli realizzati per studiare ciascuna sezione e il numero totale di elementi utilizzati.

Nelle figure 5 - 8 viene presentata la geometria dei modelli numerici di ogni sezione analizzata.

Tab. 3: Dimensioni del modello numerico nelle diverse sezioni analizzate

	DIMENSIONI MODELLO	n° ELEMENTI
<i>SEZIONE A-A'</i>	1500 x 300	450.000
<i>SEZIONE B-B'</i>	1.025x420	430.500
<i>SEZIONE C-C'</i>	1.025 x420	430.500
<i>SEZIONE D-D'</i>	1025 x 335	343.375

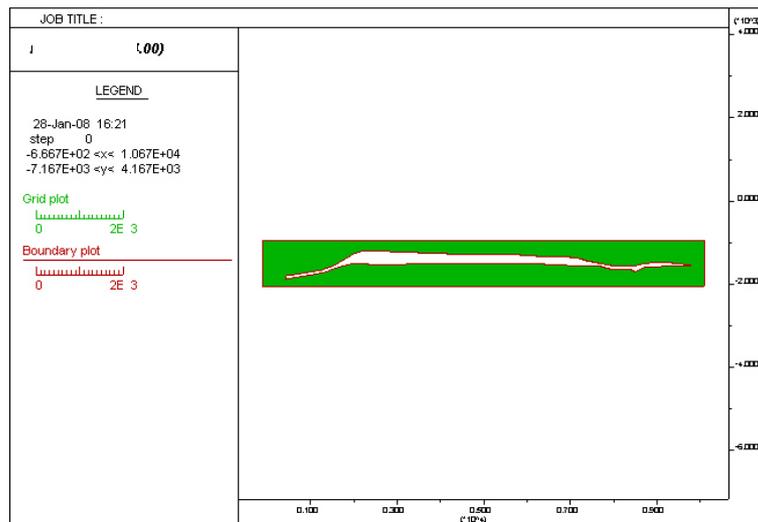


Fig. 5 - Geometria della sezione A – A'

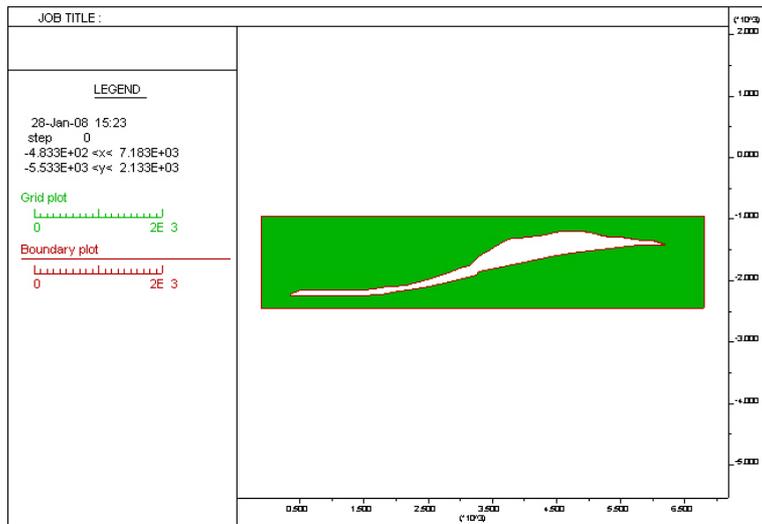


Fig. 6 - Geometria della sezione B – B'

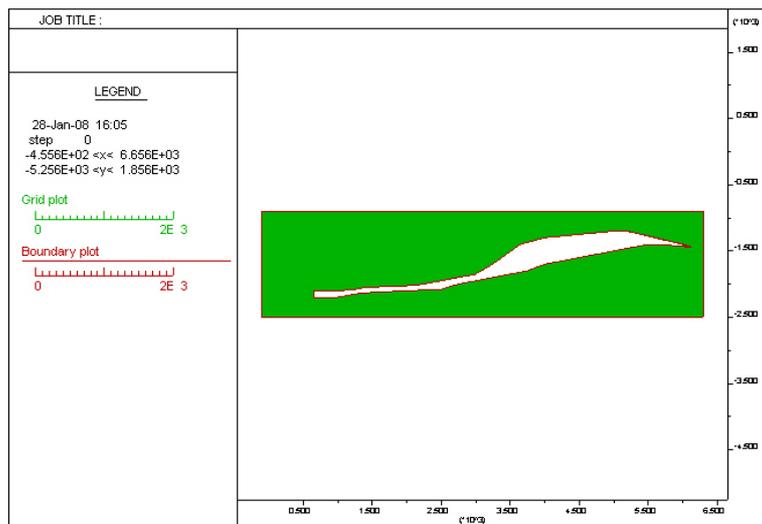


Fig. 7 - Geometria della sezione C – C'

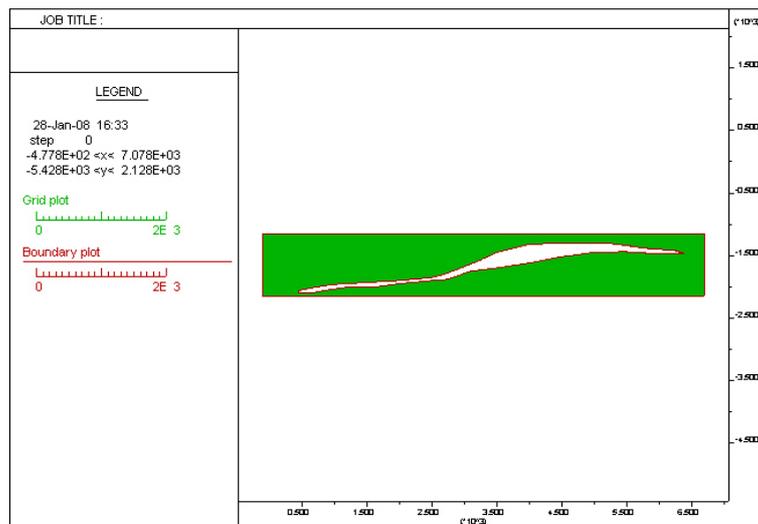


Fig. 8 - Geometria della sezione D – D'

4.2 DESCRIZIONE DEL PROCEDIMENTO DI CALCOLO

Di seguito è descritto il procedimento utilizzato per la simulazione numerica dell'effetto della pressione del gas nel giacimento, valido per tutte sezioni oggetto di studio.

L'effetto delle formazioni sovrastanti la cap rock fino al piano campagna è stato rappresentato applicando sul bordo superiore del modello una pressione verticale omogenea, dovuta al peso proprio della roccia non rappresentata direttamente nel calcolo.

Fasi della modellazione numerica disaccoppiata:

1. Costruzione della maglia di elementi e definizione delle sottoregioni.
2. Attribuzione delle proprietà delle rocce
3. Applicazione delle condizioni al contorno ed inizializzazione delle tensioni nella roccia.
4. Inizializzazione delle pressioni interstiziali nel giacimento e nella roccia al contorno di esso (la pressione del gas nel giacimento è posta pari alla pressione esistente prima dell'inizio dell'attività estrattiva).
5. Attivazione dell'accelerazione di gravità.
6. Applicazione delle forze di filtrazione al contatto tra il giacimento e la cap rock: sulla superficie di contatto è imposta una pressione pari alla differenza tra la pressione del gas nel giacimento e quella dell'acqua di falda nella cap rock.
7. Annullamento degli spostamenti e delle velocità di spostamento.
8. Riduzione progressiva della pressione del gas nel giacimento al valore minimo che si realizza al termine della fase di estrazione e conseguente innalzamento della superficie di contatto gas-acqua.
9. Annullamento delle forze di filtrazione sulla superficie di contatto tra il giacimento e la cap rock.
10. Aumento progressivo della pressione del gas nel giacimento fino al valore massimo ipotizzato e conseguente abbassamento del contatto gas-acqua.
11. Applicazione delle forze di filtrazione al contatto tra il giacimento e la cap rock.

Il termine della fase 6 corrisponde alle condizioni indisturbate che precedono l'inizio della coltivazione del campo (condizione 1: $p=p_i$); il termine della fase 9 corrisponde alla fine della fase di produzione primaria (condizione 2: $p=p_{min}$); il termine delle fase 11 corrisponde, a secondo delle ipotesi di analisi, alle fasi di stoccaggio nelle differenti condizioni di sovrappressione considerate (ovvero condizione 3: $p = p_{110\%}$, condizione 4: $p=p_{120\%}$, condizione 5: $p = p_{130\%}$).

4.3 ANALISI DEI RISULTATI DELLO STUDIO DISACCOPIATO

I risultati forniti dallo studio sono stati valutati in termini di fattori di sicurezza.

Per fattore di sicurezza in un punto della roccia si intende il minimo valore del rapporto tra la differenza tra le tensioni principali a rottura e la differenza tra le tensioni principali effettivamente presenti:

$$F_s = \frac{(\sigma_{1,r} - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{\frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2 \cdot \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (10)$$

dove: c: coesione

φ : angolo d'attrito

σ_1 : tensione principale massima esistente

σ_3 : tensione principale minima esistente

4.3.1 Condizione 1 - Condizione iniziale, con pressione nel gas pari a $p_i = 15,4$ MPa

Nelle figure 9-12 sono riportate, per ogni sezione indagata e in condizioni indisturbate ($p = p_i = 15,4$ MPa), le tensioni orizzontali efficaci, in corrispondenza della zona di culmine del giacimento.

Le figure 13-162, illustrano, per ogni sezione indagata, l'andamento del fattore di sicurezza nei confronti della rottura della roccia, nella condizione originaria ($p = p_i = 15,4$ MPa).

Si può notare come i valori più bassi siano in corrispondenza della cap rock nella porzione di culmine del giacimento, dove la pressione del gas nel giacimento induce una riduzione delle tensioni orizzontali efficaci.

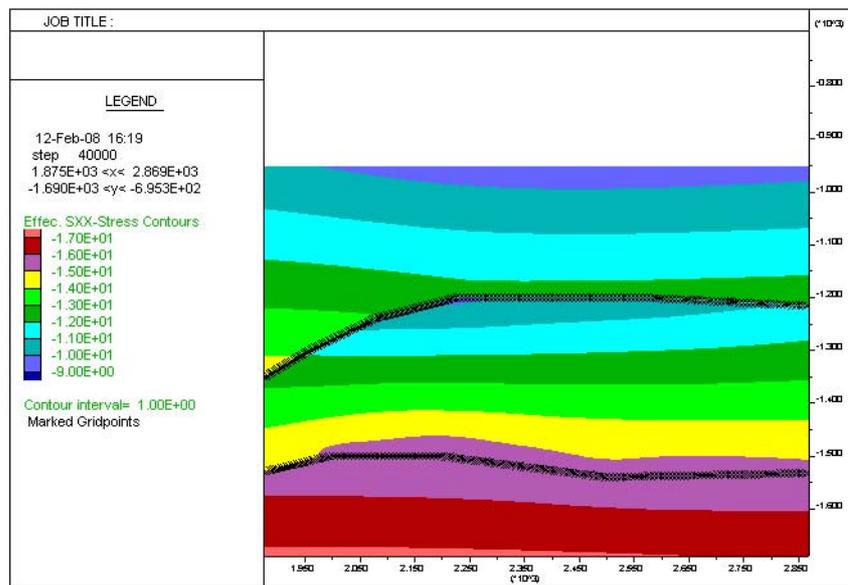


Fig. 9 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione A – A'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa nelle condizioni iniziali di pressione, in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

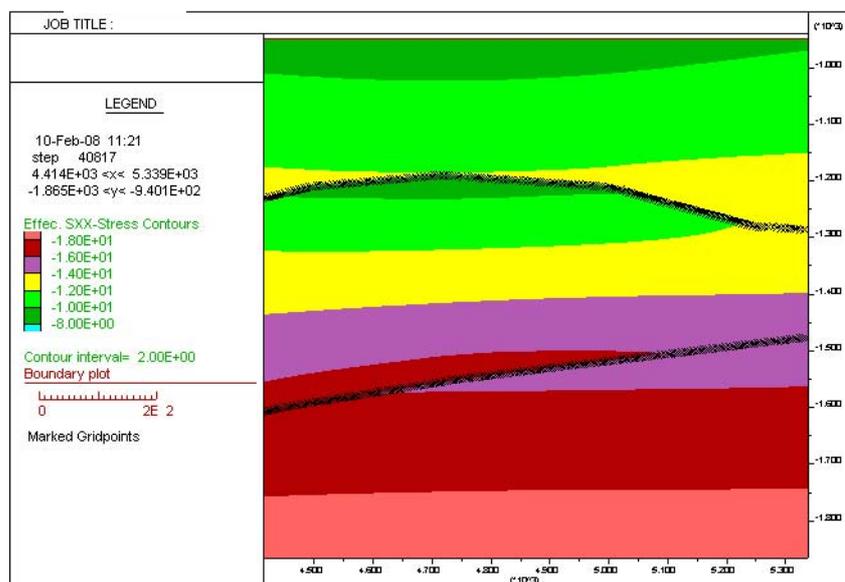


Fig. 10 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione B –B'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa nelle condizioni iniziali di pressione, in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

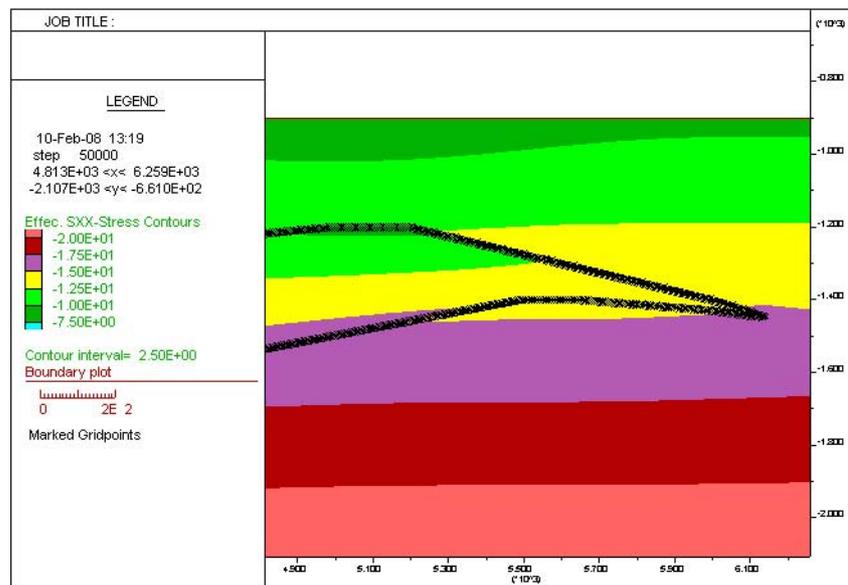


Fig. 11 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione C – C'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa nelle condizioni iniziali di pressione, in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

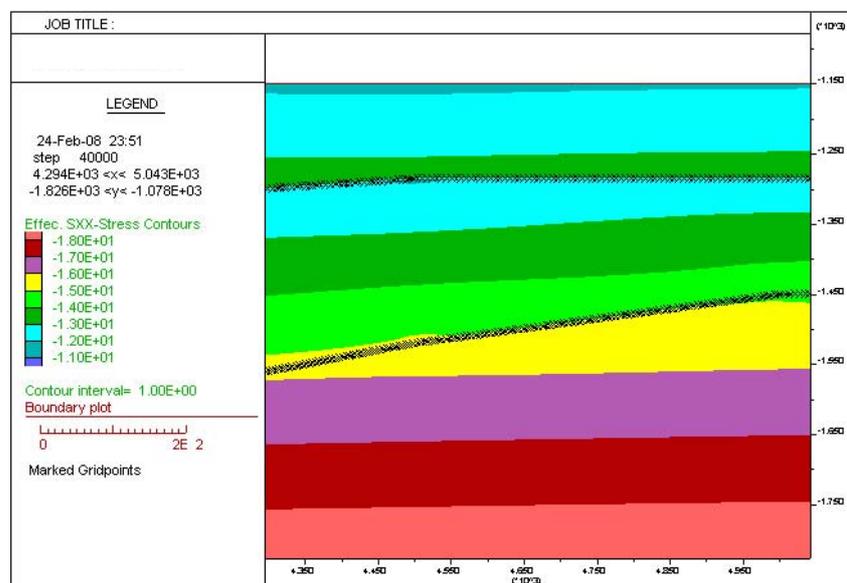


Fig. 12 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione D – D'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa nelle condizioni iniziali di pressione, in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

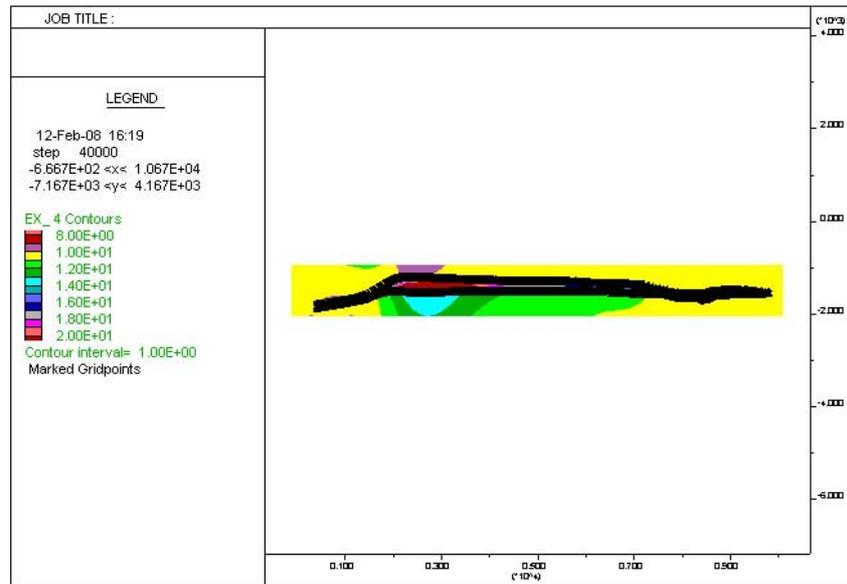


Fig. 13 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione A – A'. Fattori di sicurezza nelle condizioni iniziali di pressione

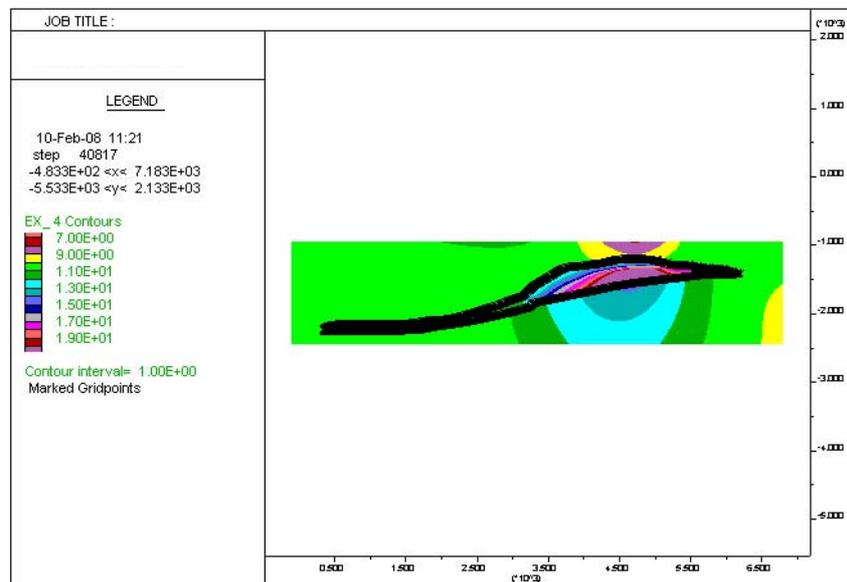


Fig. 14 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione B – B'. Fattori di sicurezza nelle condizioni iniziali di pressione

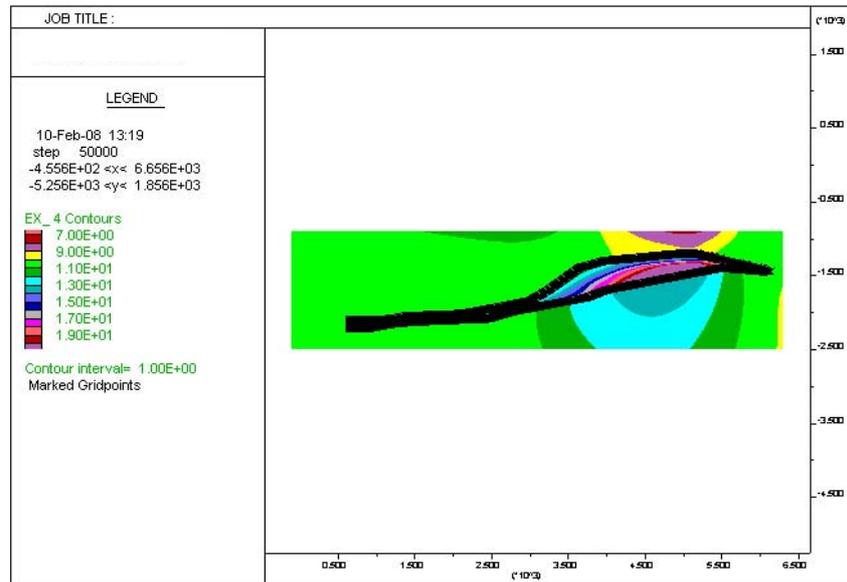


Fig. 15 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione C –C'. Fattori di sicurezza nelle condizioni iniziali di pressione

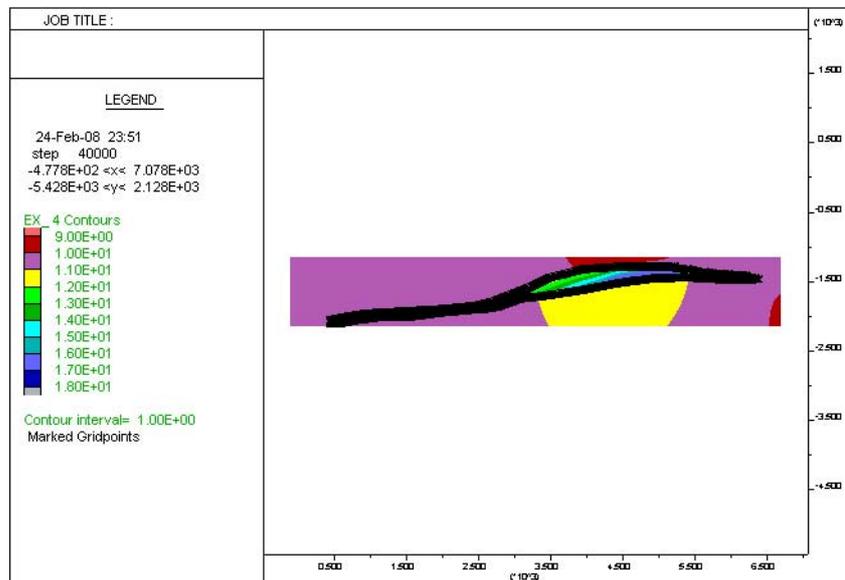


Fig. 16 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione C –C'. Fattori di sicurezza nelle condizioni iniziali di pressione

4.3.2 Condizione 2 – Condizione al termine della produzione primaria ($p_{min} = 6,94$ MPa)

Nelle figure 17-20 sono riportate, per ogni sezione indagata, le tensioni efficaci orizzontali, in corrispondenza della zona di culmine del giacimento.

Nelle figure 21-24 sono riportati, per ogni sezione indagata, i fattori di sicurezza nell'intero modello.

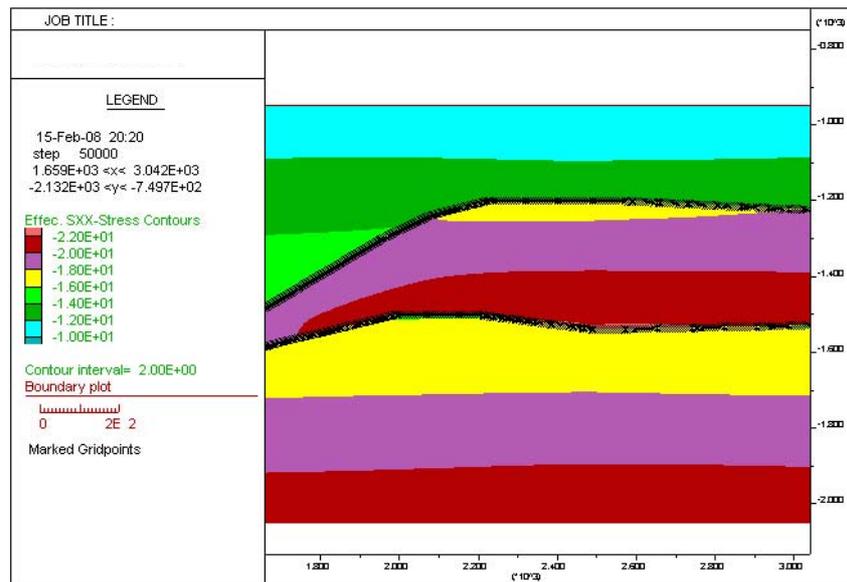


Fig. 17 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione A –A'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa al termine della produzione primaria, in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

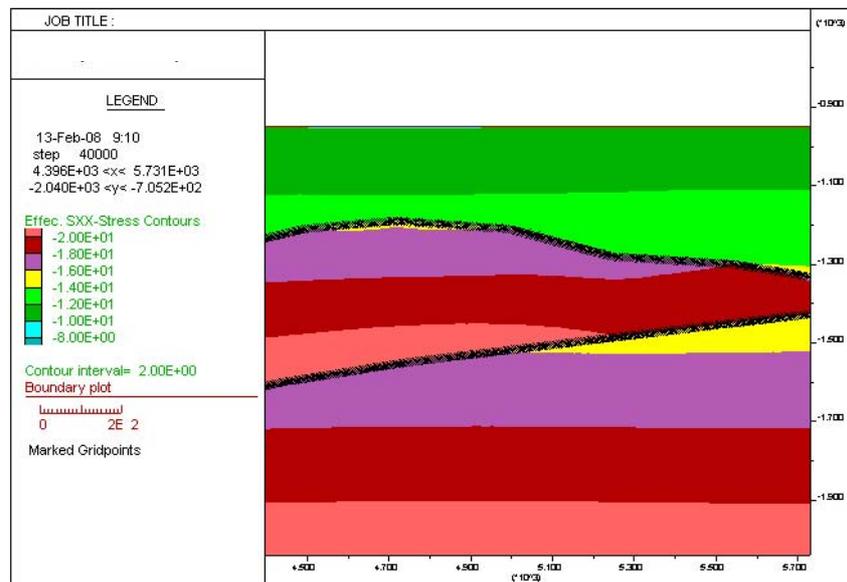


Fig. 18 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione B –B'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa al termine della produzione primaria, in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

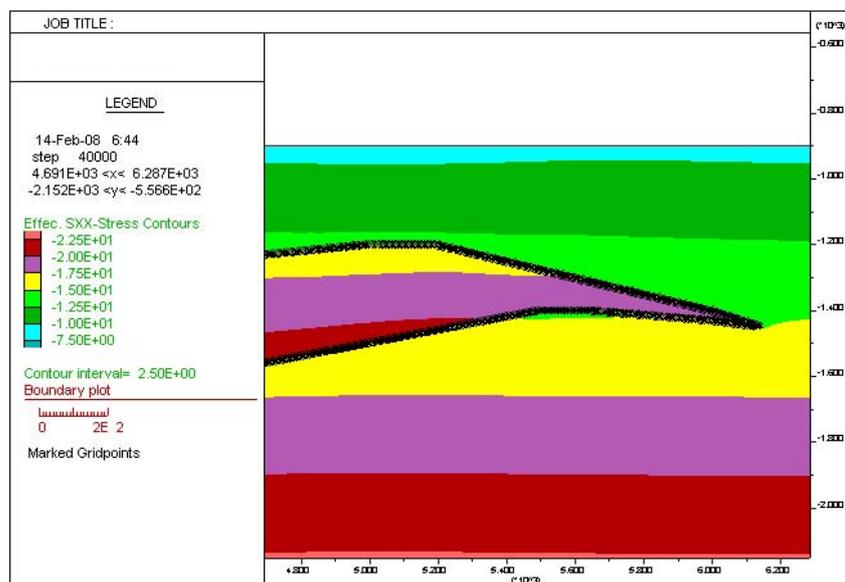


Fig. 19 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione C –C'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa al termine della produzione primaria, in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

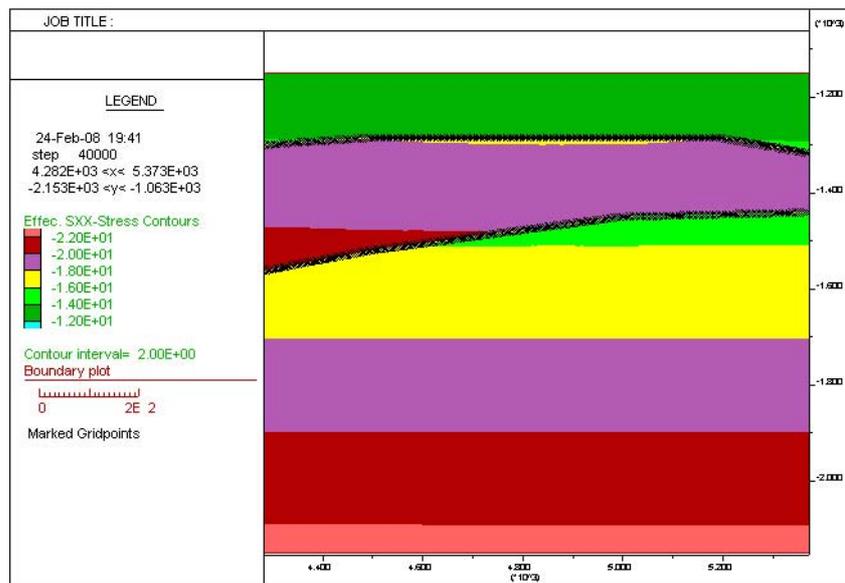


Fig. 20 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione D –D'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa al termine della produzione primaria, in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

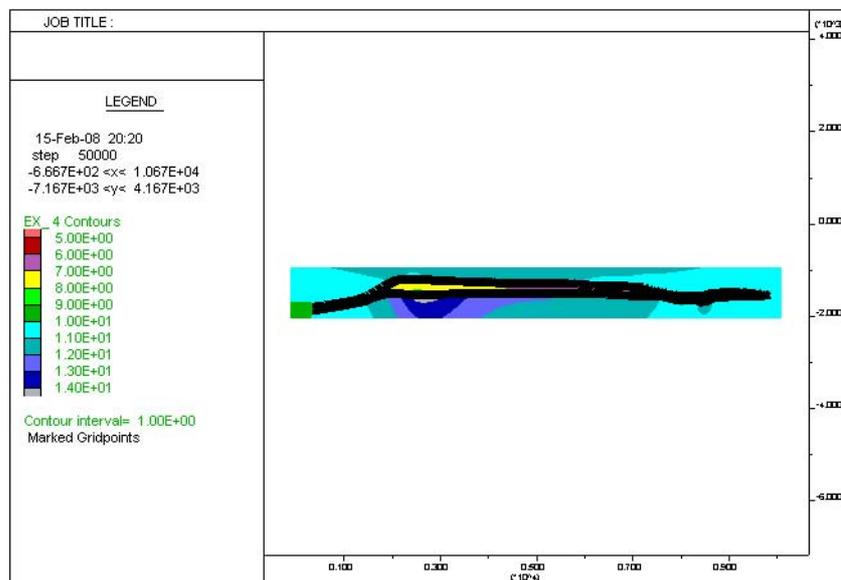


Fig. 21 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione A – A'. Fattori di sicurezza al termine della produzione primaria

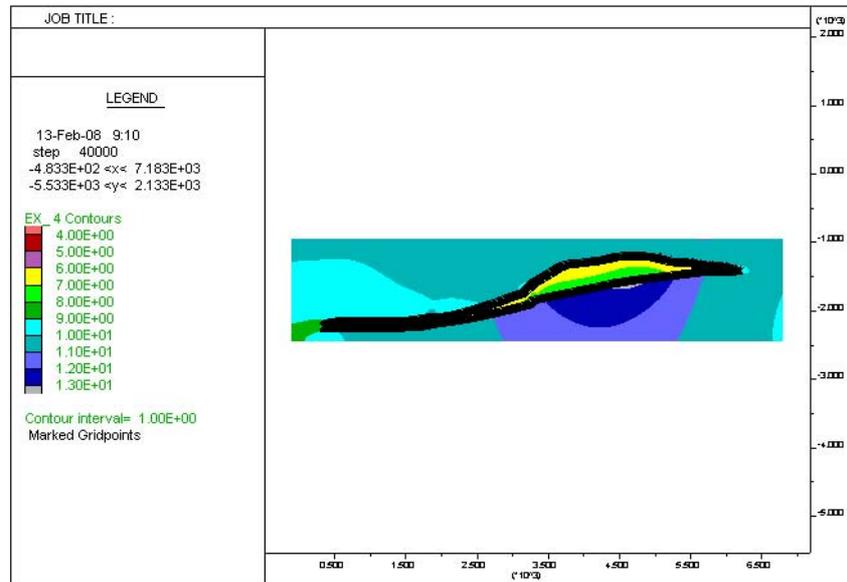


Fig. 22 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione B – B'. Fattori di sicurezza al termine della produzione primaria

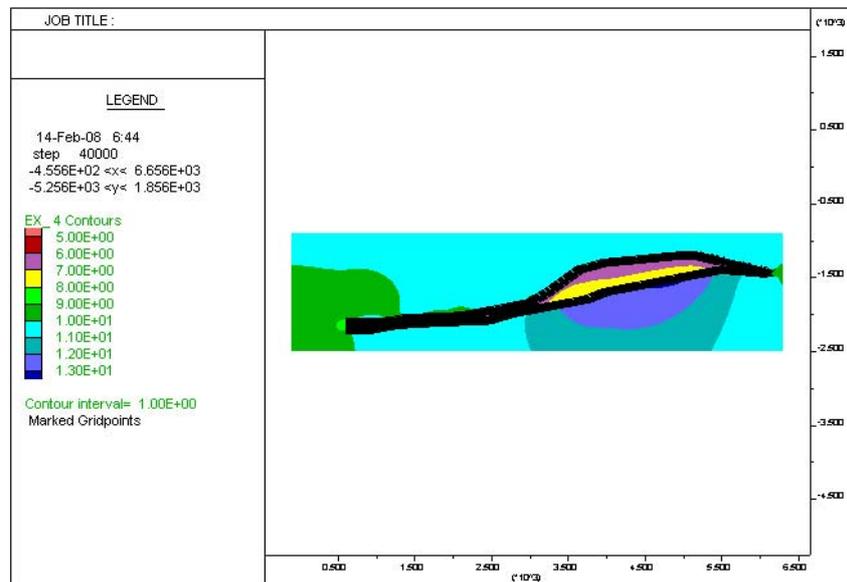


Fig. 23 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione C – C'. Fattori di sicurezza al termine della produzione primaria

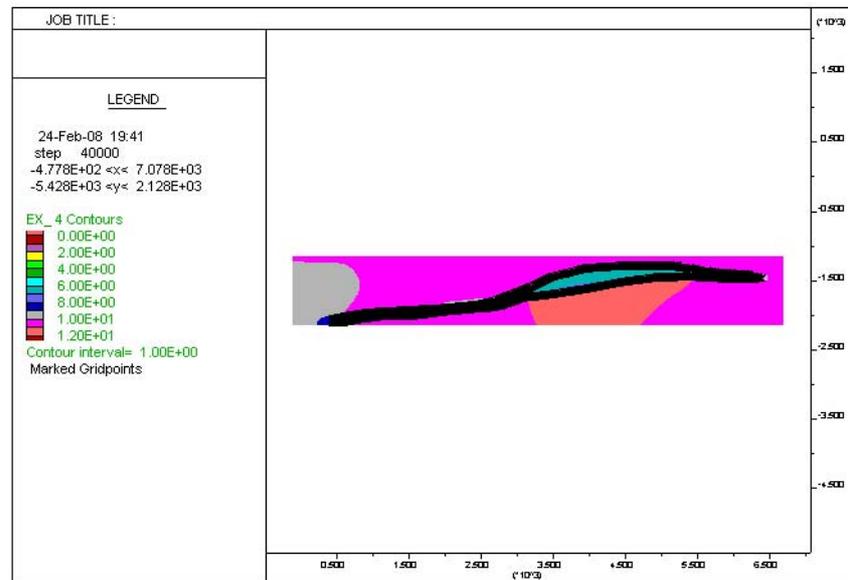


Fig. 24 - **Analisi numerica disaccoppiata della sezione D – D'. Fattori di sicurezza al termine della produzione primaria**

4.3.3 Condizione 3 – Condizione di stoccaggio del gas con pressione pari al 110% della pressione iniziale ($p_{110\%} = 16,98 \text{ MPa}$)

Nelle figure 25-28 sono riportate, per ogni sezione analizzata, le tensioni efficaci orizzontali, in corrispondenza della zona di culmine e per una pressione di stoccaggio pari al 110% della pressione iniziale.

Nelle figure 29-32 sono riportati, per ogni sezione analizzata, i fattori di sicurezza nell'intero modello in corrispondenza ad una pressione di esercizio pari al 110% della pressione originaria.

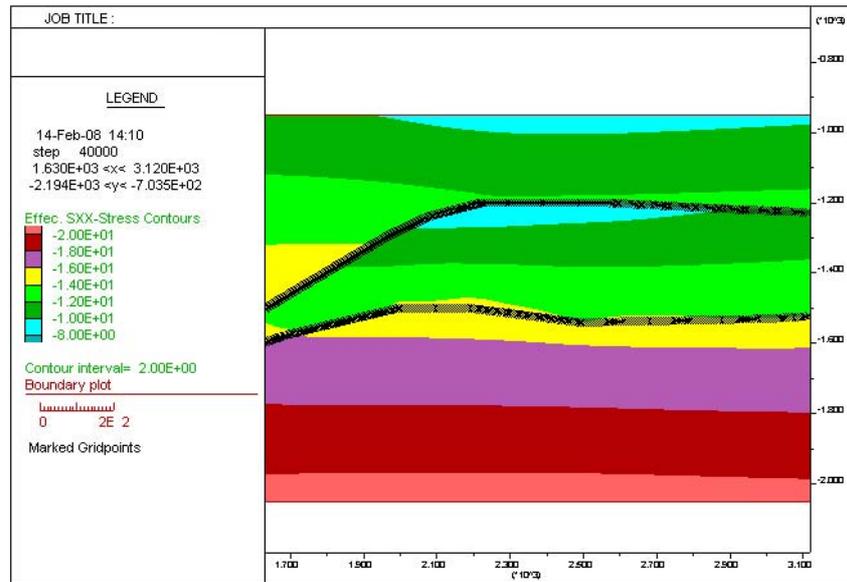


Fig. 25 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione A – A'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (110 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

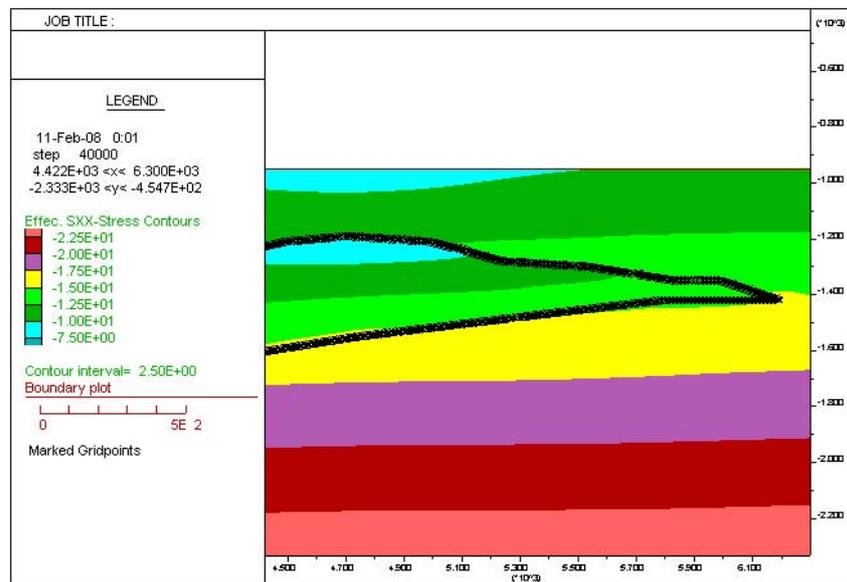


Fig. 26 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione B- B'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (110 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

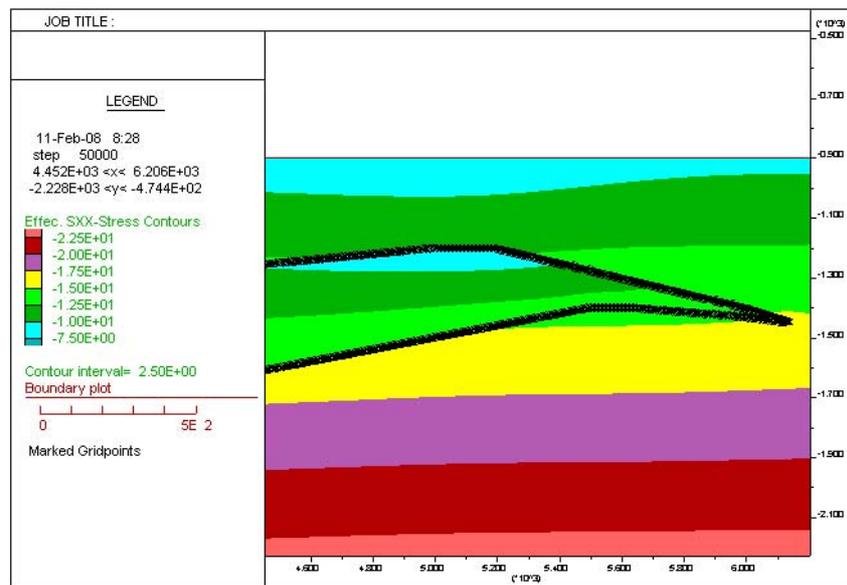


Fig. 27 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione C- C'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (110 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

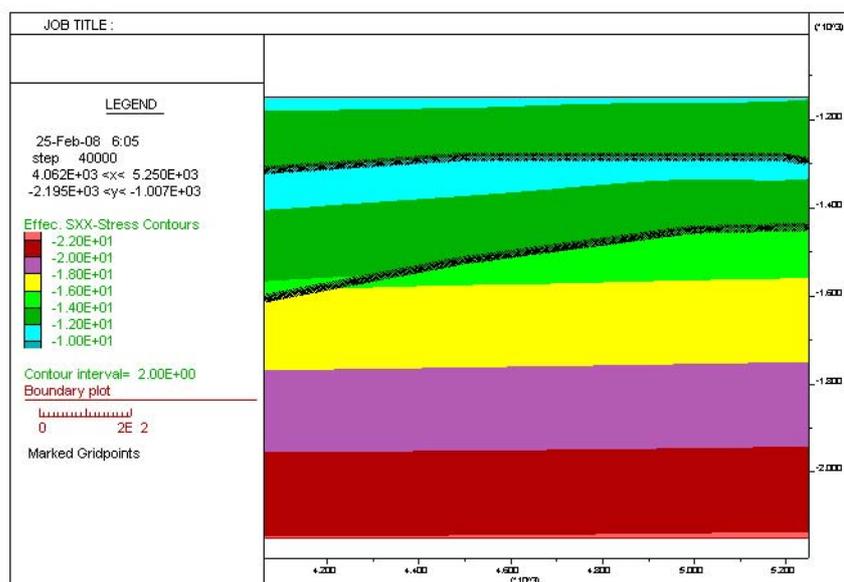


Fig. 28 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione D- D'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (110 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

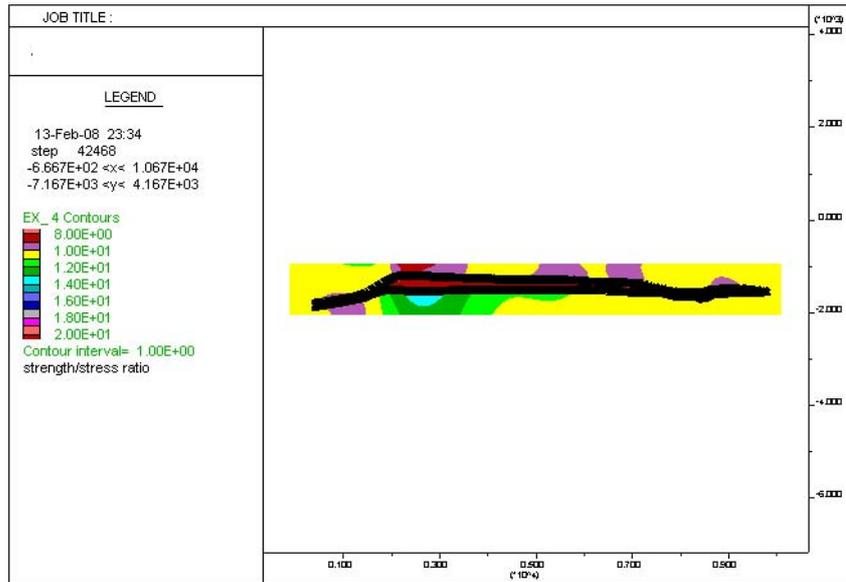


Fig. 29 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione A –A'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 110% di p_i

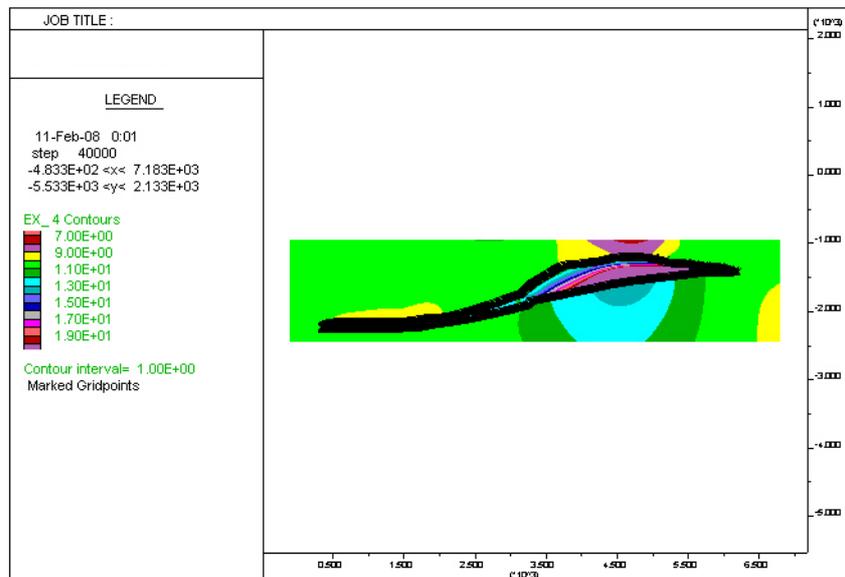


Fig. 30 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione B –B'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 110% di p_i

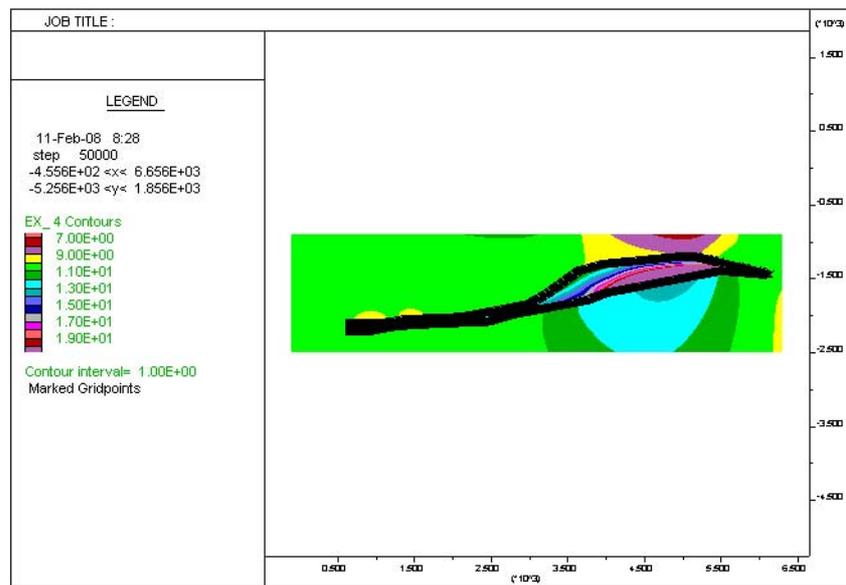


Fig. 31 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione C –C'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 110% di p_i

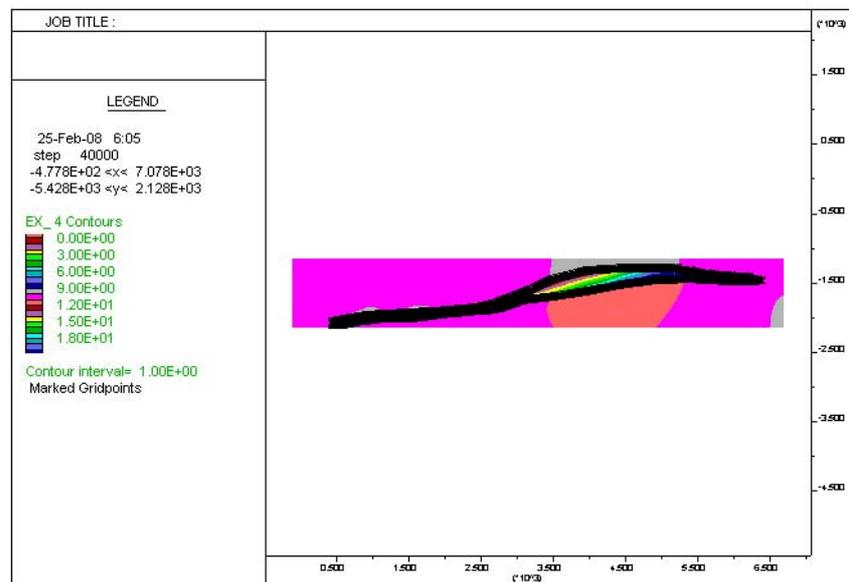


Fig. 32 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione D –D'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 110% di p_i

4.3.4 Condizione 4 – Condizione di stoccaggio del gas con pressione pari al 120% della pressione iniziale ($p_{120\%} = 18,52 \text{ MPa}$)

Nelle figure 33-36 sono riportate, per ogni sezione analizzata, le tensioni efficaci orizzontali, in corrispondenza della zona di culmine e per una pressione di stoccaggio pari al 120% della pressione iniziale.

Nelle figure 37-40 sono riportati, per ogni sezione analizzata, i fattori di sicurezza nell'intero modello in corrispondenza ad una pressione di esercizio pari al 120% della pressione originaria.

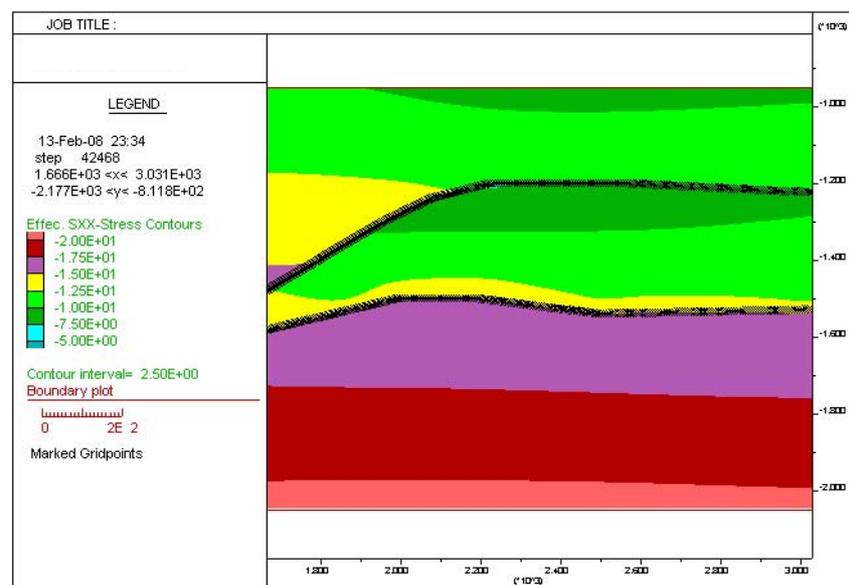


Fig. 33 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione A – A'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (120 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

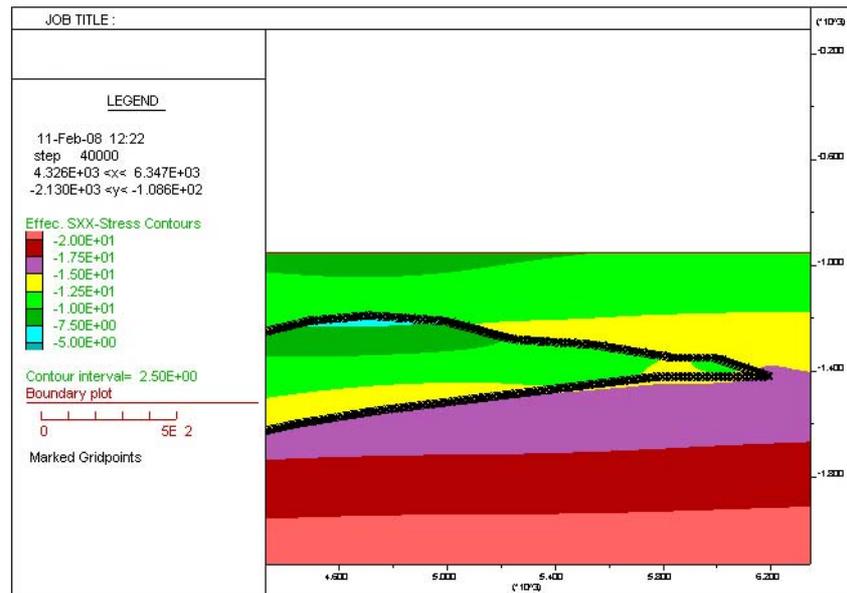


Fig. 34 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione B – B'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (120 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

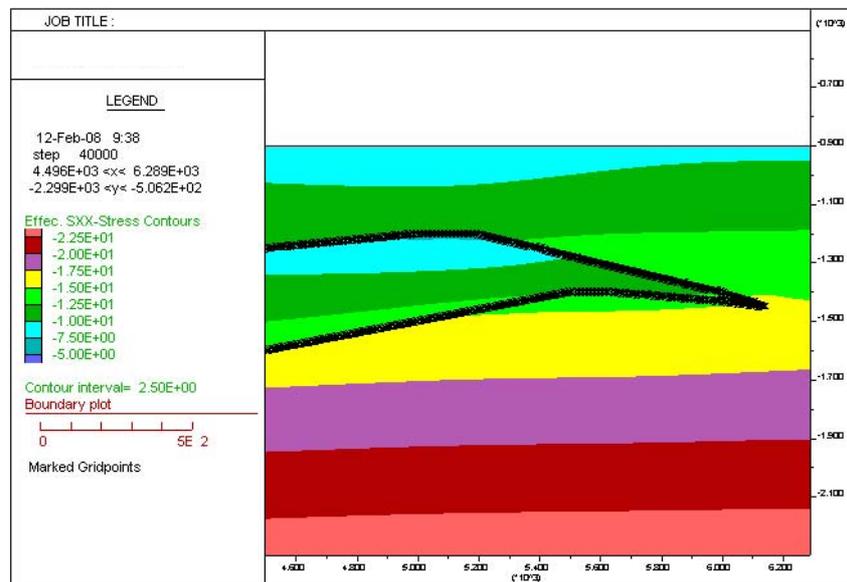


Fig. 35 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione C – C'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (120 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

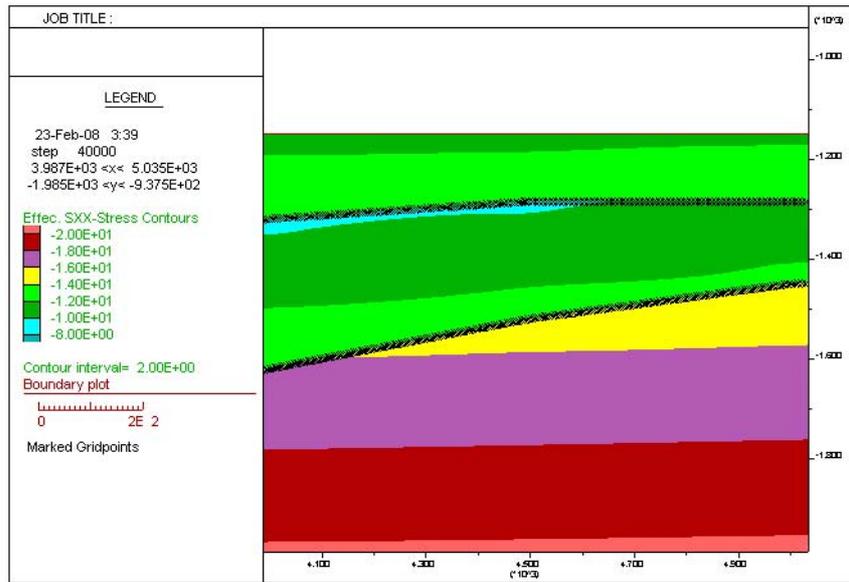


Fig. 36 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione D – D'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (120 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

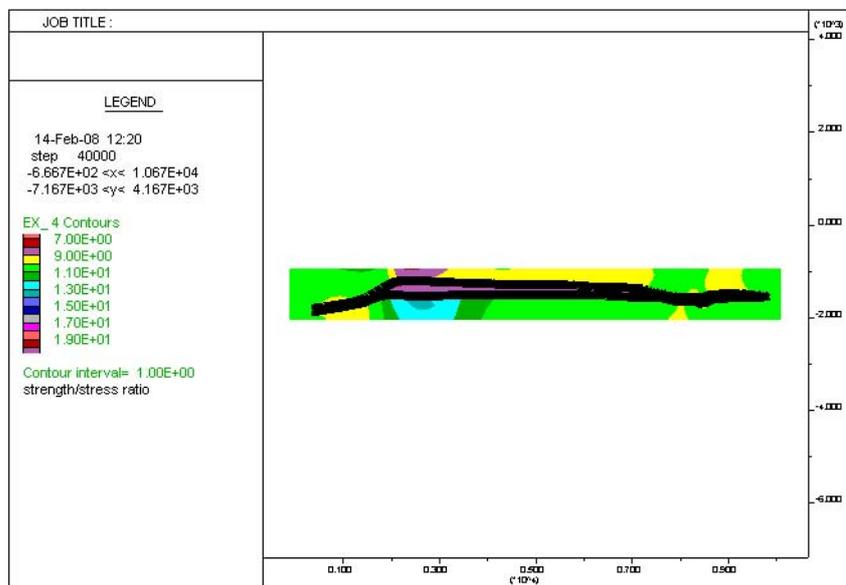


Fig. 37 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione A –A'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 120% di p_i

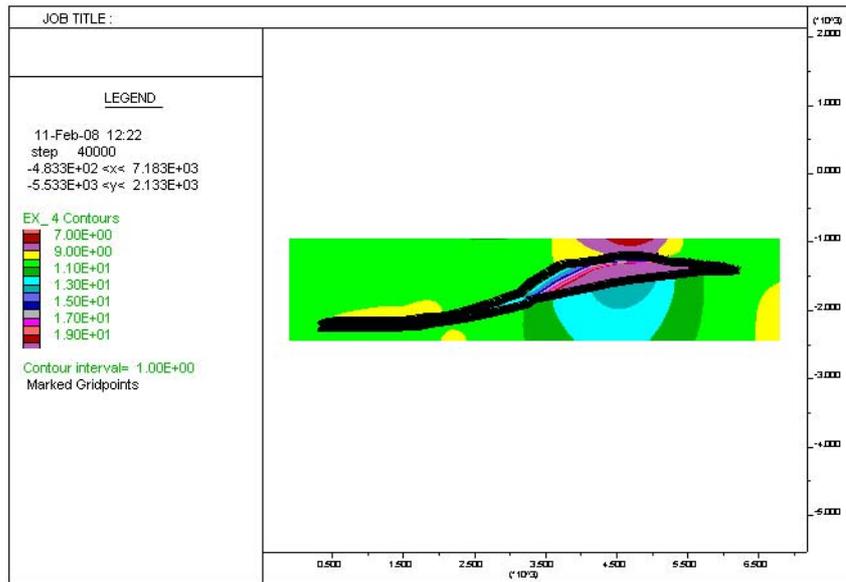


Fig. 38 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione B –B'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 120% di p_i

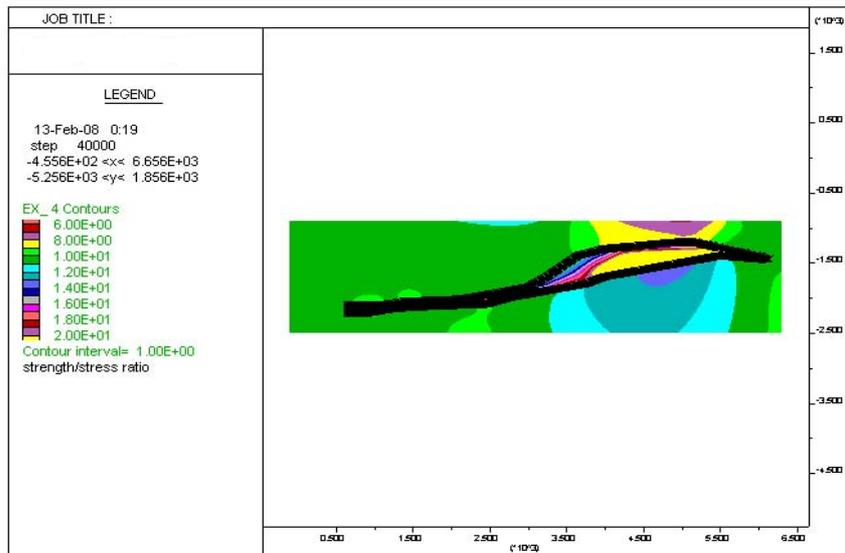


Fig. 39 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione C –C'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 120% di p_i

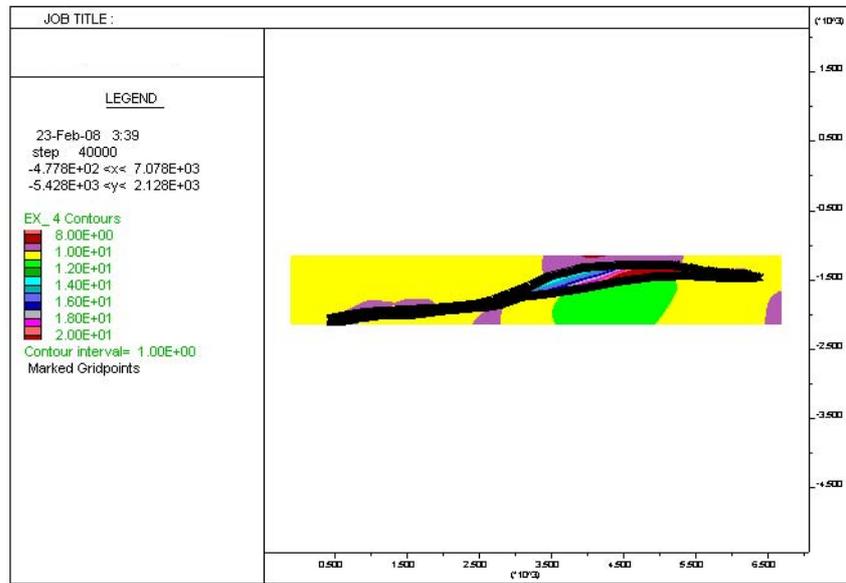


Fig. 40 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione D –D'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 120% di p_i

4.3.5 Condizione 5 – Condizione di stoccaggio del gas con pressione pari al 130% della pressione iniziale ($p_{130\%} = 20,72 \text{ MPa}$)

Nelle figure 41-44 sono riportate, per ogni sezione analizzata, le tensioni efficaci orizzontali, in corrispondenza della zona di culmine e per una pressione di stoccaggio pari al 130% della pressione iniziale.

Nelle figure 45-48 sono riportati, per ogni sezione analizzata, i fattori di sicurezza nell'intero modello in corrispondenza ad una pressione di esercizio pari al 130% della pressione originaria.

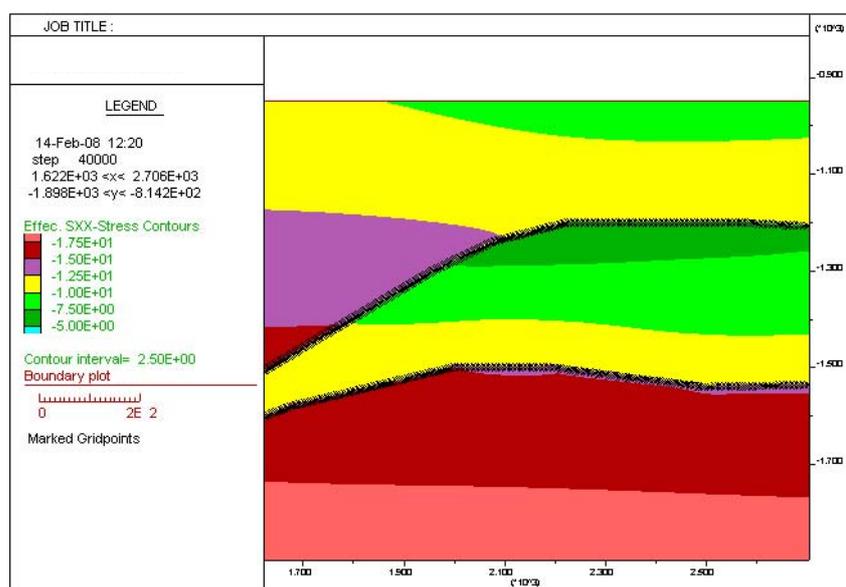


Fig. 41 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione A – A'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (130 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

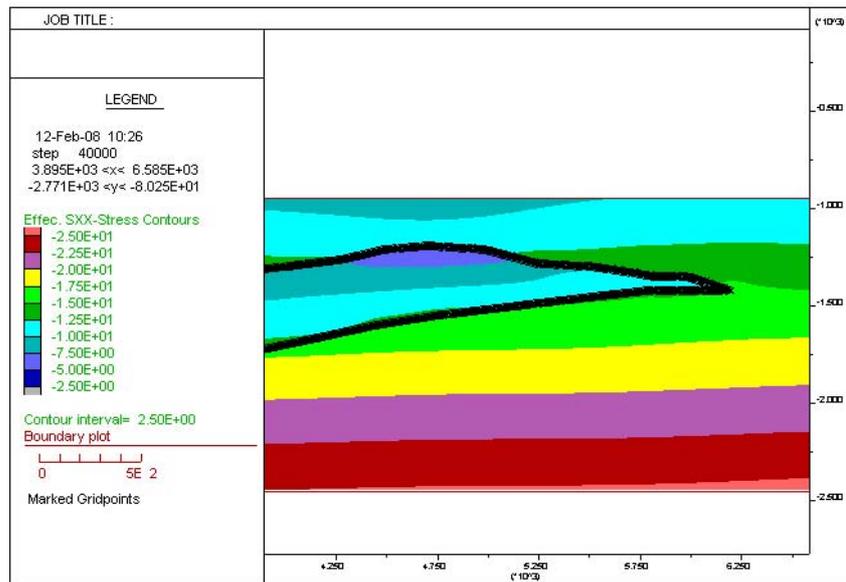


Fig. 42 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione B – B'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (130 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

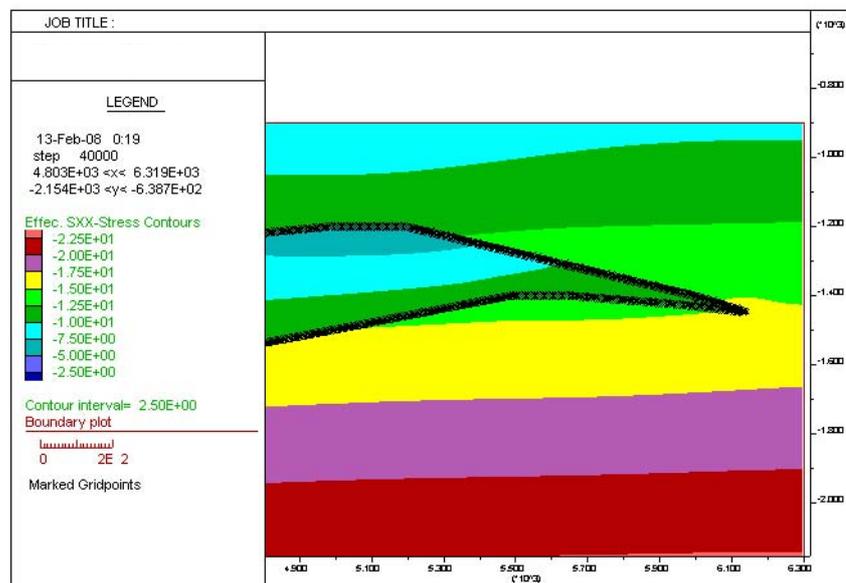


Fig. 43 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione C – C'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (130 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

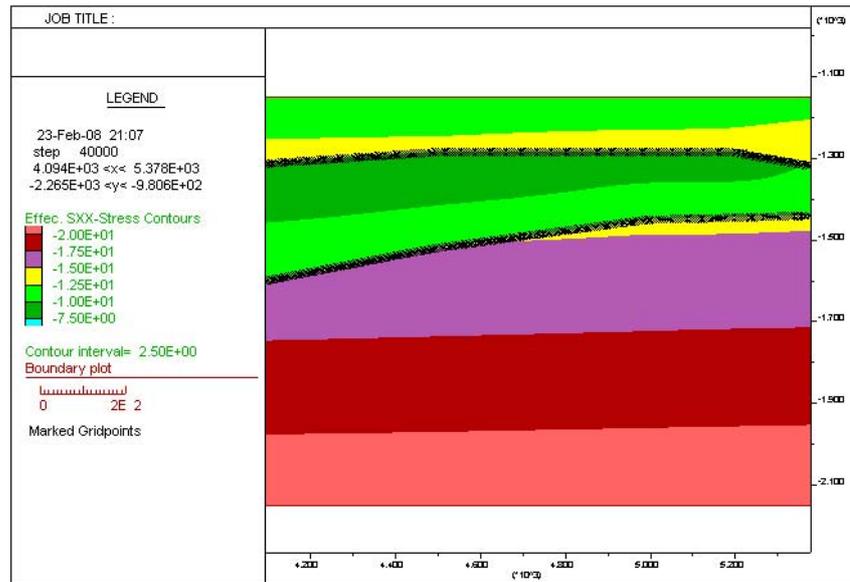


Fig. 44 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione D – D'. Tensioni orizzontali efficaci in MPa relative a condizioni di stoccaggio in sovrappressione (130 % p_i), in corrispondenza della zona di culmine del giacimento, con indicazione della superficie di contatto tra la roccia-serbatoio e la cap rock

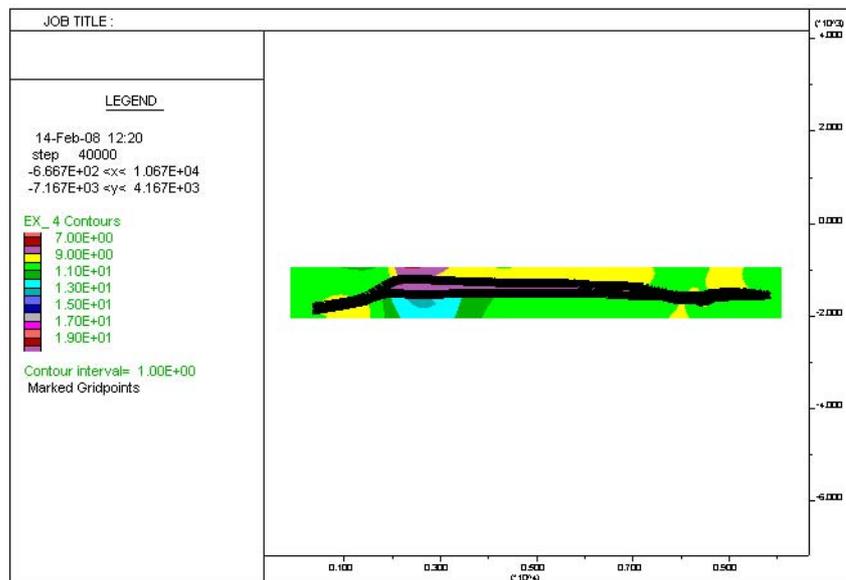


Fig. 45 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione A –A'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 130% di p_i

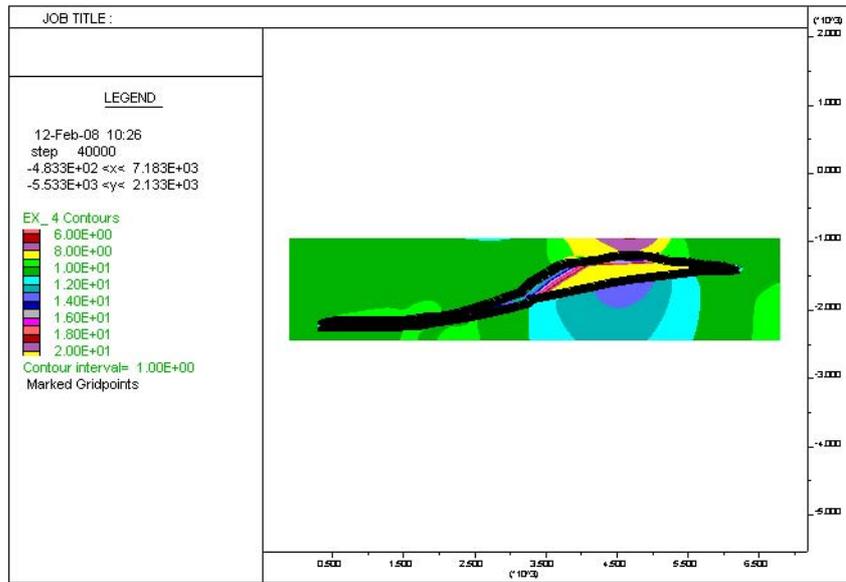


Fig. 46 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione B –B'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 130% di p_i

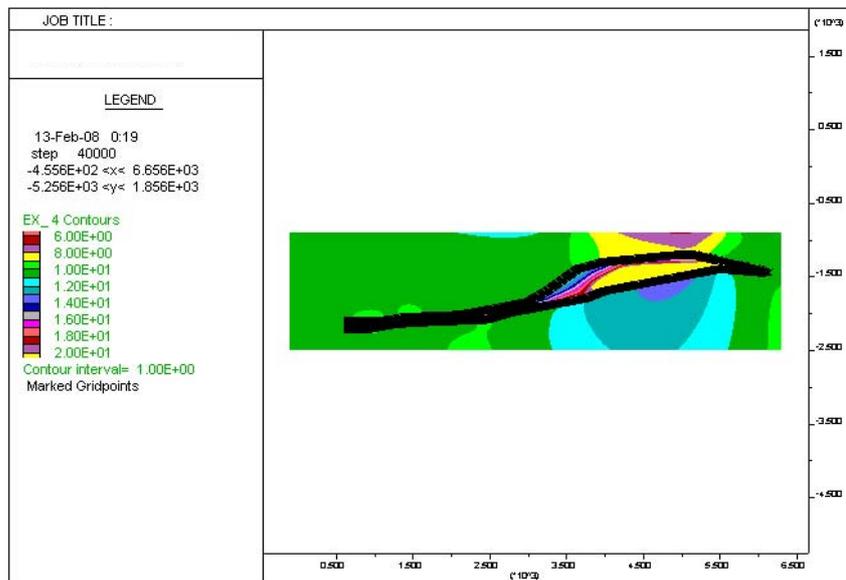


Fig. 47 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione C –C'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 130% di p_i

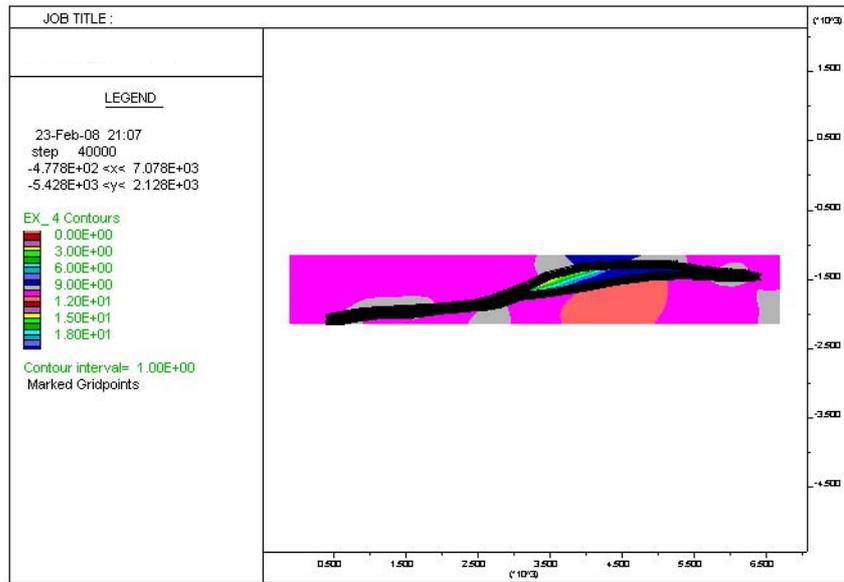


Fig. 48 - Analisi numerica disaccoppiata della sezione D –D'. Fattori di sicurezza in corrispondenza di una pressione di esercizio pari al 130% di p_i

5 CONCLUSIONI

Lo studio geomeccanico ha avuto come scopo l'individuazione delle condizioni tensionali e deformative che si realizzano nel giacimento di stoccaggio di Sergnano e nella sovrastante cap rock, in relazione a differenti pressioni di esercizio.

Le analisi del comportamento tenso-deformativo sono state effettuate con un metodo numerico 2D alle differenze finite, secondo un approccio di tipo disaccoppiato, e sono state riferite alle quattro sezioni ritenute rappresentative del giacimento. Lo studio è stato sviluppato in campo elastico, visto che sulla base di analisi preliminari non è stato riscontrato il raggiungimento del limite elastico in nessun punto del modello numerico.

L'analisi ha consentito di simulare la risposta deformativa e tensionale del giacimento e della cap rock in relazione a cinque scenari di esercizio che consentono di ripercorrere temporalmente l'evoluzione del campo durante la sua vita operativa:

- pressione iniziale (15,4 MPa): corrispondente alle condizioni indisturbate;
- pressione minima (6,9 MPa): corrispondente alla fine della fase di produzione primaria;
- pressione di esercizio pari al 110% della p_i (16,98 MPa);
- pressione di esercizio pari al 120% della p_i (18,52 MPa);
- pressione di esercizio pari al 130% della p_i (20,72 MPa).

I risultati forniti dalla modellizzazione numerica sono stati valutati in termini di fattori di sicurezza, ottenuti confrontando lo stato tensionale determinato dal calcolo con l'involuppo a rottura definito dal criterio di Mohr-Coulomb.

Dall'analisi delle tensioni e dei fattori di sicurezza risulta che la roccia al contorno del giacimento permane in ogni fase in campo elastico, con tensioni di confinamento sempre molto alte. Le tensioni di confinamento minime si rilevano nella cap rock in prossimità del culmine del giacimento: scendono ad un valore minimo di 10,8 MPa per una pressione del gas pari al 130 % del valore originario.

Anche i fattori di sicurezza nella cap rock sono sempre elevati. Ovviamente si riducono al crescere della pressione interna del gas, ma risultano sempre maggiori di 7,5 in ogni fase analizzata e in ognuna delle quattro sezioni studiate.

Nelle tabelle seguenti (tab. 4 - 5) sono riportati i valori delle tensioni di confinamento minime nella cap rock in corrispondenza del culmine del giacimento e i fattori di sicurezza minimi nella roccia al contorno del giacimento, per tutti e cinque gli scenari di esercizio analizzati.

Tab. 4: Tabella riassuntiva dei valori di tensione efficace orizzontale (tensione di confinamento) nella zona di culmine per le tre sezioni studiate in tutte le fasi dell'analisi

	SEZ A	SEZ B	SEZ C	SEZ D
FASE A	12,5	11,5	12	12,5
FASE B	13	12	12,5	13
FASE C	12	11,2	11,8	12
FASE D	11,5	11	11,5	11,8
FASE E	11	10,8	11,2	11,5

Tab. 5: Tabella riassuntiva dei valori del fattore di sicurezza minimo per le tre sezioni in tutte le fasi dell'analisi

	SEZ A	SEZ B	SEZ C	SEZ D
FASE A	10	9	8,8	9,3
FASE B	10,5	9,5	9	10,5
FASE C	9,5	8,5	8,5	10
FASE D	9	8	8,2	9,3
FASE E	8	7,5	7,8	8,5

Le deformazioni orizzontali medie nella cap rock sono di 3 mm / 100 m (distensione) in condizioni di stoccaggio pari al 110% della p_i , di 5 mm / 100 m (distensione) in condizioni di stoccaggio pari al 120% della p_i , e di 7,5 mm / 100 m (distensione) in condizioni di stoccaggio pari al 130% della p_i .

Dall'analisi tensionale e deformativa e sulla base dell'andamento dei fattori di sicurezza al variare della pressione di stoccaggio del gas, si può rilevare la tenuta della roccia al contorno del serbatoio durante lo stoccaggio in sovrappressione fino ad un valore della pressione di esercizio pari al 130% di quello originario (massimo valore considerato nella modellazione numerica).