

RICHIESTA n. 5

“uno studio geomeccanico della roccia serbatoio e del cap-rock, con verifica degli stati limite, effettuato al fine di verificare il comportamento sotto sforzo del materiale”

PROGETTO “SINARCA STOCCAGGIO”

Relazione tecnica integrativa allo Studio di Impatto Ambientale

STUDIO GEOMECCANICO

Il presente documento è composto da n° 46 pagine progressivamente numerate.

Emissione: 01
Data: Marzo 2008
Doc. n° 07-SIA-25081-5
Commessa: 25081
File: 25081_E01_5.doc

TECSA S.p.A.
IL DIRETTORE
Vincio Rossini




**petroleum
engineering
group**



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

**CONTRATTO DI CONSULENZA TRA IL POLITECNICO DI
TORINO E LA SOCIETÀ GASPLUS N. G17B3283/00 SB**

**VALUTAZIONE DELL'IDONEITÀ, DAL PUNTO DI VISTA
DELLA TENUTA IDRAULICA E DEL COMPORTAMENTO
GEOMECCANICO, DEL CAMPO DI STOCCAGGIO DI
SINARCA, LIVELLO 'R6', AD ESSERE OPERATO IN
SOVRAPPRESSIONE**

Settembre 2007



INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	GEOLOGIA DI RESERVOIR E COPERTURA	3
3	VERIFICA DELLA TENUTA IDRAULICA DELLA COPERTURA	4
3.1	Pressione alla base dello strato di copertura	4
3.2	Pressione di soglia.....	4
4	ANALISI TENSO-DEFORMATIVA DELLA ROCCIA SERBATOIO E DELLA ROCCIA DI COPERTURA	6
4.1	Introduzione	6
4.2	Caratterizzazione geotecnica.....	7
4.2.1	<i>Parametri geomeccanici</i>	7
4.3	Metodo numerico utilizzato.....	10
4.4	Simulazione numerica con modellazione disaccoppiata.....	12
4.4.1	<i>Geometria delle sezioni studiate</i>	13
4.4.2	<i>Descrizione del procedimento di calcolo</i>	15
4.4.3	<i>Analisi dei risultati dello studio disaccoppiato</i>	16
4.4.3.1	<i>FASE A - Condizione iniziale con $p_i = 15.2$ MPa</i>	17
4.4.3.2	<i>FASE B - Condizione di stoccaggio del gas a $p = 1.1 p_i$ ($p_{110\%} = 16.72$ MPa)</i> ..	25
4.4.3.3	<i>FASE C - Condizione di stoccaggio del gas a $p = 1.3 p_i$ ($p_{130\%} = 19.76$ MPa)</i> ..	30
4.4.3.4	<i>FASE D - Condizione di stoccaggio del gas a $p = 1.5 p_i$ ($p_{150\%} = 22.8$ MPa)</i> ...	37
5	CONCLUSIONI	44
6	BIBLIOGRAFIA	46



1 INTRODUZIONE

L'obiettivo del presente lavoro è consistito nel verificare la possibilità futura di migliorare le prestazioni e di incrementare la produttività del campo di Sinarca, livello 'R6', mediante il superamento della pressione iniziale della formazione qualora il giacimento, ormai esaurito, venisse convertito allo stoccaggio sotterraneo del gas naturale.

La possibilità di superare la pressione originale della formazione è stata verificata in relazione alla resistenza meccanica ed alla tenuta idraulica della roccia di copertura (*cap-rock*). Il successo di un progetto di stoccaggio di gas naturale in formazioni sotterranee, infatti, dipende in gran parte dalla presenza di una roccia di copertura che costituisca una barriera al naturale flusso del gas verso l'alto. Qualora, per incrementare la capacità di uno stoccaggio realizzato in un giacimento esaurito, si intenda superare la pressione originale della formazione, si deve verificare che la roccia di copertura non solo possieda adeguate caratteristiche di resistenza meccanica ma anche la capacità di ostacolare i fenomeni di filtrazione allo scopo di evitare indesiderate fughe di gas. Nel caso dei giacimenti di idrocarburi il pur limitato volume poroso della roccia di copertura, al momento della scoperta, è di solito completamente saturo di acqua, la cui presenza garantisce la capacità della roccia di copertura di agire come barriera isolante nei confronti del gas. Le differenze di pressione all'interno della roccia di copertura sono in genere piuttosto limitate e, solitamente, sono determinate dal gradiente idrostatico. Un eventuale incremento della pressione del gas contenuto nella roccia serbatoio non induce flusso di fluidi attraverso la roccia di copertura che delimita superiormente il giacimento finché non viene raggiunto un determinato valore di soglia della pressione, che dipende dall'entità delle forze capillari. Per incrementi di pressione superiori a tale valore di soglia iniziano ad aver luogo fenomeni di spiazzamento dell'acqua e, potenzialmente, di filtrazione del gas attraverso la roccia di copertura. Nel caso del giacimento di Sinarca il massimo valore di sovrappressione ammissibile affinché la tenuta idraulica delle argille di copertura non sia compromessa è stato determinato sulla base del valore della pressione di soglia misurato mediante analisi di laboratorio.

Per quanto riguarda le condizioni tensionali e deformative della roccia serbatoio e della roccia di copertura, esse sono state calcolate mediante analisi geomeccaniche 2D di tipo disaccoppiato in corrispondenza di valori di sovrappressione massima rispettivamente pari al 10%, al 30% e al 50% della pressione di scoperta del giacimento. La valutazione della capacità di uno stoccaggio sotterraneo di sopportare pressioni del gas superiori a quelle inizialmente presenti in giacimento mediante studi geomeccanici basati sulla modellizzazione numerica è pratica già utilizzata negli Stati Uniti ed in Canada. L'analisi numerica permette, infatti, di analizzare i tre fattori che influenzano la capacità di un giacimento di sopportare in sicurezza pressioni del gas superiori a quelle iniziali, ovvero le caratteristiche meccaniche dei litotipi presenti, lo stato tensionale litostatico nella roccia serbatoio e nella copertura e le variazioni delle



condizioni tensionali nella roccia serbatoio e al suo contorno durante le fasi di iniezione e produzione del gas. Le analisi di tipo disaccoppiato non prendono in considerazione il flusso dei fluidi interstiziali, ma unicamente la presenza di pressioni neutre nei pori della roccia. Si assume che le pressioni non varino nel tempo anche se si manifesta un'evoluzione delle deformazioni della roccia e si verificano flussi di acqua o di gas all'interno dei pori.

Nel caso del giacimento di Sinarca, dopo aver caratterizzato dal punto di vista geomeccanico i litotipi presenti sulla base dei dati a disposizione alla data di stesura della presente relazione e per analogia a situazioni similari, sono state messe a punto modellazioni numeriche che hanno consentito di sviluppare l'analisi tenso-deformativa delle 3 sezioni verticali del giacimento giudicate più significative. In particolare l'obbiettivo è stato quello di verificare le condizioni di sicurezza nei riguardi della rottura per taglio e per fessurazione.



2 GEOLOGIA DI RESERVOIR E COPERTURA

I livelli 'R' che costituiscono il giacimento di Sinarca appartengono alla formazione pliocenica di Carassai, ubicata all'interno della successione stratigrafica del bacino molisano.

Il giacimento risulta costituito da una blanda struttura anticlinalica non interessata dalla presenza di faglie.

Il livello 'R6', oggetto del presente studio, è stato raggiunto dai pozzi Sinarca 1D, 2D, 3D e Masseria Salvatore 1DA. I pozzi Sinarca 1D, 3D e Masseria Salvatore 1DA intercettano il livello in posizione di alto strutturale, mentre il pozzo Sinarca 2D intercetta il livello lungo il fianco nord orientale, in posizione di basso strutturale. Il livello presenta una profondità media di circa 1250 m TVD ss e uno spessore variabile tra 13 e 16 m e risulta costituito da sabbie a granulometria medio-fine e silt. Non si osservano sensibili variazioni litologiche tra i pozzi.

Dall'analisi dei log di pozzo, in particolare di quello registrato al pozzo Sinarca 3D, risulta evidente come, oltre i 1000 m di profondità, il segnale Gamma Ray sia decisamente più elevato, ad indicare come la formazione acquisisca un carattere prevalentemente argilloso. I livelli 'R' appaiono quindi come singoli corpi sabbiosi collocati all'interno di una sequenza di tipo argilloso.

Nonostante si siano evidenziati oltre 200 metri di materiale argilloso, per tenere in debito conto la presenza degli altri livelli 'R' soprastanti al livello 'R6' si è operata la scelta conservativa di considerare come copertura in senso stretto unicamente lo spessore argilloso compreso tra i livelli 'R5' e 'R6'. Lo spessore di tali argille risulta variare tra 8 m, in corrispondenza dei pozzi Sinarca 1D e 3D, e 25 m, in corrispondenza del pozzo Masseria Salvatore 1DA.



3 VERIFICA DELLA TENUTA IDRAULICA DELLA COPERTURA

La tenuta idraulica della roccia di copertura di un giacimento utilizzato per lo stoccaggio sotterraneo del gas è assicurata quando la roccia può essere considerata omogenea e la pressione massima di esercizio dello stoccaggio è inferiore alla pressione (p_{max}) alla quale si verifica la penetrazione del gas nella copertura. Tale pressione è definita come:

$$p_{max} = p_w + p_{threshold}$$

dove p_w è la pressione dell'acqua valutata alla base della copertura e $p_{threshold}$ è la pressione di soglia, ovvero quella pressione alla quale il gas inizia a spiazzare l'acqua che satura la roccia di copertura (generalmente argille). La pressione di soglia ($p_{threshold}$) viene tipicamente misurata in laboratorio, ma può anche essere determinata mediante analisi di prove condotte in sito.

3.1 Pressione alla base dello strato di copertura

Nel livello 'R6' la pressione iniziale era pari a 149.2 Barsa @ *datum depth*, mentre la pressione iniziale nel livello 'R5', soprastante la copertura del livello 'R6', era pari a 145.5 Barsa @ *datum depth*. Ne consegue che i due livelli si trovavano in condizioni iniziali di sovrappressione, con un gradiente medio pari a circa 0.12 Barsa/m. Poiché è del tutto verosimile ipotizzare che anche la roccia di copertura compresa tra questi due livelli sabbiosi sia in sovrappressione, la pressione dei fluidi alla base dello strato di copertura può essere stimata pari a 147.5 Barsa.

3.2 Pressione di soglia

La pressione di soglia rappresenta il valore minimo di pressione a cui il gas, vincendo la pressione capillare della roccia satura in acqua, inizia a fluire attraverso di essa. Per la misura in laboratorio della pressione di soglia sono stati utilizzati 3 campioni (*plug*) della roccia di copertura, recuperati durante la perforazione del pozzo Masseria Salvatore 1DA.

I tre campioni sono stati recuperati in prossimità del *top* del livello R6 (tabella 1) e pertanto sono da ritenersi rappresentativi della copertura anche nelle zone del giacimento in cui essa si assottiglia.

Tab. 1: Profondità dei *plug* ottenuti dalla roccia di copertura

Plug #	Profondità [m RT]
4	1827.73
11	1829.39
14	1831.59



Per i *plug* n° 4 e n° 11 è stata raggiunta una pressione di soglia compresa tra 41-43 Barsa, mentre per il *plug* n° 14, nonostante la curva granulometrica sia in linea con quella degli altri due campioni e il rapporto di laboratorio non segnali possibili alterazioni delle caratteristiche della roccia dovute a disidratazione dell'argilla, la pressione di soglia è risultata pari a 15 Barsa.

È plausibile ritenere che le proprietà del campione per il quale è stata misurata la pressione di soglia più bassa, prelevato in prossimità del *top* del giacimento, siano intermedie tra quelle del giacimento e quelle della copertura e che possa considerarsi effettivamente rappresentativo di tutta la copertura il valore di circa 40 Barsa.

Considerando una pressione di soglia di 40 Barsa si ottiene una pressione di esercizio massima ammissibile di circa 187 Barsa, corrispondente ad una sovrappressione del 26%.

4 ANALISI TENSO-DEFORMATIVA DELLA ROCCIA SERBATOIO E DELLA ROCCIA DI COPERTURA

4.1 Introduzione

L'analisi geomeccanica sviluppata ha avuto come scopo l'individuazione delle condizioni tensionali e deformative che si potranno realizzare all'interno e al contorno del giacimento a gas di Sinarca, Livello 'R6', qualora esso venisse convertito ad attività di stoccaggio sotterraneo del gas naturale ed operato a pressioni massime superiori alla pressione di scoperta. Dopo aver caratterizzato dal punto di vista geomeccanico i litotipi presenti sulla base dei dati a disposizione alla data di stesura della presente relazione e per analogia a situazioni similari, sono state messe a punto modellazioni numeriche in grado di studiare nel dettaglio i diversi aspetti del problema. Si sono analizzate tre sezioni verticali del giacimento (fig. 1), di cui una in direzione longitudinale (A-A') e due in direzione trasversale (B-B', C-C').

Di particolare interesse è stata l'analisi del comportamento delle rocce in presenza di una pressione del gas superiore rispettivamente del 10%, del 30% e del 50% al valore di pressione iniziale del giacimento. Dal calcolo è stato possibile prevedere le tensioni e le deformazioni nella roccia serbatoio e soprattutto nella roccia di copertura (*cap-rock*) che si otterrebbero in corrispondenza delle pressioni massime indicate e, quindi, le condizioni di sicurezza nei riguardi della rottura per fessurazione.

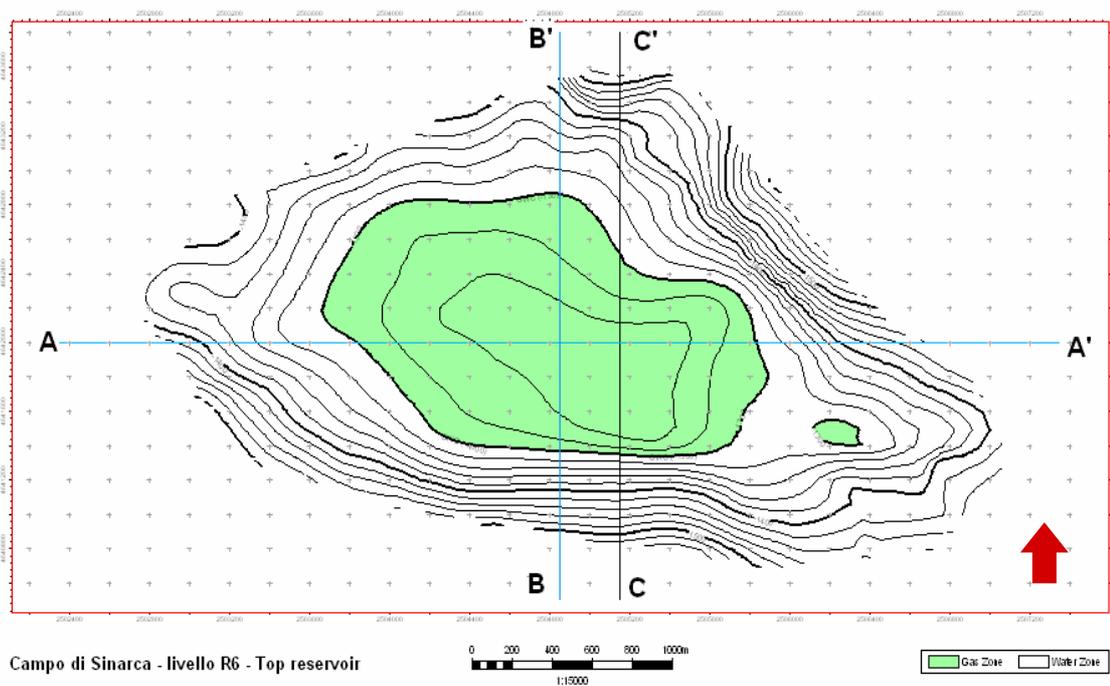


Fig. 1 - Rappresentazione delle sezioni analizzate sulla vista in pianta del giacimento

L'analisi numerica sviluppata ha permesso di tener debitamente conto dei tre fattori che influenzano la capacità del giacimento a sopportare in sicurezza pressioni del gas superiori a quella iniziale (*Gas Research Institute*, 1998):

- le caratteristiche meccaniche 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 le fasi di iniezione ed estrazione del gas.

Il *Gas Research Institute* (1998) ha messo a punto 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 dai cicli di iniezione ed estrazione 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.

Qualora le informazioni e indagini necessarie per stimare le caratteristiche meccaniche delle rocce e lo stato tensionale litostatico siano carenti o del tutto assenti, si suggerisce di fare riferimento a correlazioni empiriche e a valutazioni in analogia con situazioni simili.

4.2 Caratterizzazione geotecnica

4.2.1 Parametri geomeccanici

Per il giacimento oggetto di studio sono disponibili alcune prove di laboratorio di tipo triassiale eseguite su campioni prelevati dal pozzo Masseria Salvatore 1 dir A, a profondità comprese tra 1827.16 m e 1832.34 m. La pressione di confinamento applicata durante le prove è stata di 2.5 e 10 MPa.

I provini utilizzati per le prove di carico triassiale avevano diametro di circa 25 mm e altezza compresa tra 28 e 52 mm.

Dall'esame dei risultati delle prove di laboratorio sono stati desunti i parametri meccanici dei litotipi presenti, riportati nella tabella 2. Per i parametri meccanici della



cap-rock e della roccia di copertura, in assenza di valori sperimentali, si è fatto riferimento a giacimenti aventi caratteristiche simili.

Tab. 2: Parametri geomeccanici attribuiti ai litotipi presenti sulla base delle indagini di laboratorio disponibili e per analogia a situazioni simili. 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 (fig. 2), come pure il coefficiente di Poisson è quello secante al 50% del carico di rottura.

Roccia serbatoio

<i>Parametri geomeccanici</i>	<i>Valore</i>
Densità (kg/m ³)	1920
Coefficiente di Poisson	0.29
Modulo di deformazione E _d (MPa)	3500
Coesione c (MPa)	7
Angolo d'attrito Φ (°)	20
Resistenza a trazione σ _t (MPa)	7

Roccia di copertura

<i>Parametri geomeccanici</i>	<i>Valore</i>
Densità (kg/m ³)	2000
Coefficiente di Poisson	0.15
Modulo di deformazione E _d (MPa)	1500
Coesione c (MPa)	1.64
Angolo d'attrito Φ (°)	25
Resistenza a trazione σ _t (MPa)	1.00

Sedimenti soprastanti

<i>Parametri geomeccanici</i>	<i>Valore</i>
Densità (kg/m ³)	1920
Coefficiente di Poisson	0.15
Modulo di deformazione E _d (MPa)	2400
Coesione c (MPa)	1.35
Angolo d'attrito Φ (°)	26
Resistenza a trazione σ _t (MPa)	0.85

I parametri di resistenza, coesione e angolo d'attrito desunti dalle prove di laboratorio fanno riferimento alla rottura 'macroscopica' del materiale rilevata in laboratorio. In effetti, però, si verificano fenomeni di plasticizzazione localizzati

(‘microscopici’) già prima di raggiungere la rottura macroscopica (fig. 2). Tali fenomeni localizzati comportano un movimento relativo tra i grani che non è recuperabile e che rappresenta la causa primaria della diversità del modulo elastico nei rami di carico e scarico tensionale. Poiché per semplicità si adotta una relazione lineare tra sforzi e deformazioni in campo elastico prima di raggiungere la rottura macroscopica della roccia, non si riescono a rappresentare correttamente nel calcolo tali fenomeni di rottura localizzati. Non è quindi possibile neanche considerare un modulo elastico differente nei rami di carico e scarico. Nel seguito, comunque, e' stato adottato un modulo elastico per la roccia serbatoio inferiore al valor medio rilevato dalle prove di laboratorio, in modo da rendere cautelativamente sovrastimate le deformazioni nella roccia serbatoio e conseguentemente sottostimati i fattori di sicurezza nella *cap-rock*. Per un'analisi di dettaglio delle effettive condizioni deformative della roccia serbatoio, sarebbe necessario adottare modelli di comportamento più complessi che richiederebbero la definizione di numerosi parametri di calcolo; questi ultimi possono essere stimati solo in presenza di specifiche e complesse prove di laboratorio. Per la finalità del presente studio si ritiene sufficiente l'adozione di un modello di comportamento semplificato, perchè comunque cautelativo nei risultati che produce.

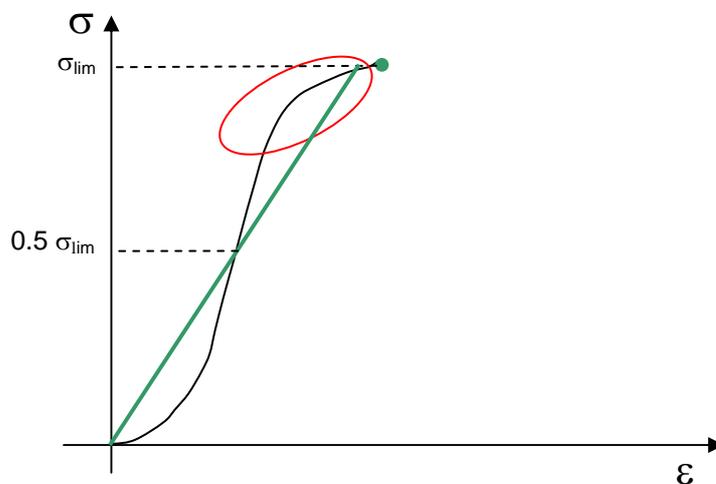


Fig. 2 - Curva sforzi-deformazioni durante una prova di carico in laboratorio. Nella zona individuata in rosso, dove la relazione sforzi-deformazioni perde la linearità, si rilevano rotture microscopiche della roccia. In verde la relazione lineare, considerata valida in campo elastico, prima del raggiungimento della rottura macroscopica.

4.3 Metodo numerico utilizzato

L'analisi tenso-deformativa della roccia-serbatoio e della cap-rock durante i cicli di estrazione-iniezione è sviluppata attraverso la modellazione numerica del mezzo continuo equivalente. Il metodo utilizzato è quello 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) ver. 4.

Il FLAC è un solutore esplicito alle differenze finite (FDM) (Cundall, 1976; Itasca Consulting Group, 1999) 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 (fig. 3).

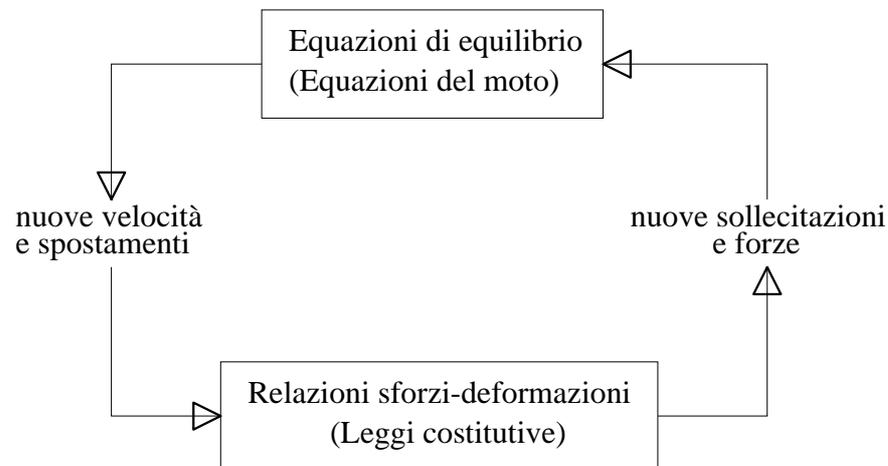


Fig. 3 - Ciclo-base del calcolo esplicito con FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua).

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 é 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 è la 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 utilizzato in 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, invece, il FDM è molto competitivo, poiché, contrariamente al FEM, non sono richiesti lunghi e dispendiosi processi iterativi.

4.4 Simulazione numerica con modellazione disaccoppiata

Lo studio numerico ha analizzato tre sezioni giudicate rappresentative del giacimento (fig. 1).

Sulla base di alcune analisi preliminari si è osservato che la roccia si manteneva sempre in condizioni lontane dalla plasticità e, pertanto, si è scelto di condurre la simulazione in campo elastico. La determinazione del fattore di sicurezza è stata quindi eseguita confrontando lo stato tensionale valutato in campo elastico con l'involuppo di rottura secondo il criterio di Mohr-Coulomb (definito sulla base della coesione, dell'angolo d'attrito e della resistenza a trazione).

Lo studio ha reso necessario inizializzare le tensioni geostatiche e le pressioni neutre nei vuoti interstiziali del modello.

Le fasi simulate dall'analisi numerica sono le seguenti quattro:

- A. situazione iniziale, prima della messa in produzione primaria del giacimento (pressione iniziale: $p_i = 15.20$ MPa)
- B. situazione di stoccaggio del gas con pressione massima pari al 110% della pressione iniziale ($p_{110\%} = 16.72$ MPa)
- C. situazione di stoccaggio del gas con pressione massima pari al 130% della pressione iniziale ($p_{130\%} = 19.76$ MPa)
- D. situazione di stoccaggio del gas con pressione massima pari al 150% della pressione iniziale ($p_{150\%} = 22.80$ MPa)

Ad ognuna delle quattro condizioni analizzate corrisponde una quota stimata del contatto gas-acqua in giacimento:

- Fase A ($p = p_i$): 1300 m;
- Fase B ($p = p_{110\%}$): 1282 m;
- Fase C ($p = p_{130\%}$): 1291 m;
- Fase D ($p = p_{150\%}$): 1300 m.

Nella *cap-rock* e nei livelli superiori alla *cap-rock* è stata assunta una pressione neutra costante nelle quattro diverse condizioni analizzate. A scopo cautelativo, il regime delle pressioni dell'acqua assunto nella *cap-rock* corrisponde a quello idrostatico, anche se i valori di pressioni rilevati nelle formazioni sabbiose superiore e inferiore, mineralizzate a gas, indicano che l'intera sequenza si trova in condizioni di sovrappressione naturale pari al 20%.

4.4.1 Geometria delle sezioni studiate

I litotipi presi in considerazione sono i seguenti:

- roccia serbatoio
- roccia di copertura
- sedimenti soprastanti alla roccia di copertura

Nelle sezioni oggetto di studio, lo spessore della roccia-serbatoio è risultato variabile da un minimo di 13 m ad un massimo di 16 m; mentre lo spessore della *cap-rock* è compreso tra 8 m, nella zona di culmine del giacimento, e 25 m nelle zone esterne.

Le sezioni di analisi sono state discretizzate in elementi rettangolari di dimensioni 4 m x 2 m; nella tabella 3 sono indicate le dimensioni dei modelli realizzati per studiare ciascuna sezione e il numero totale di elementi utilizzati.

Nelle figure 4 - 6 viene presentata la geometria dei modelli numerici di ogni sezione analizzata, con indicazione dei litotipi assegnati.

Tab. 3: Dimensioni delle sezioni

	DIMENSIONI SEZIONE	DIMENSIONI GRIGLIA	n° ELEMENTI
<i>SEZIONE A-A'</i>	4.560 m x 320 m	1140 x 160	182.400
<i>SEZIONE B-B'</i>	3.300 m x 380 m	825 x 190	156.750
<i>SEZIONE C-C'</i>	2.900 m x 450 m	725 x 225	163.125

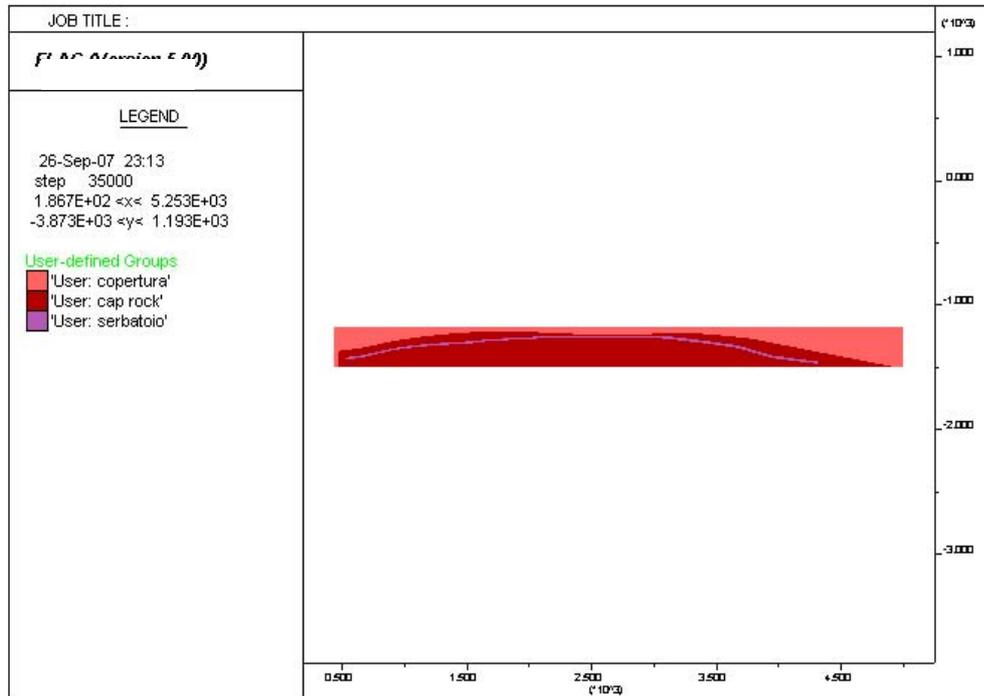


Fig. 4 - Geometria del modello numerico della sezione A-A'

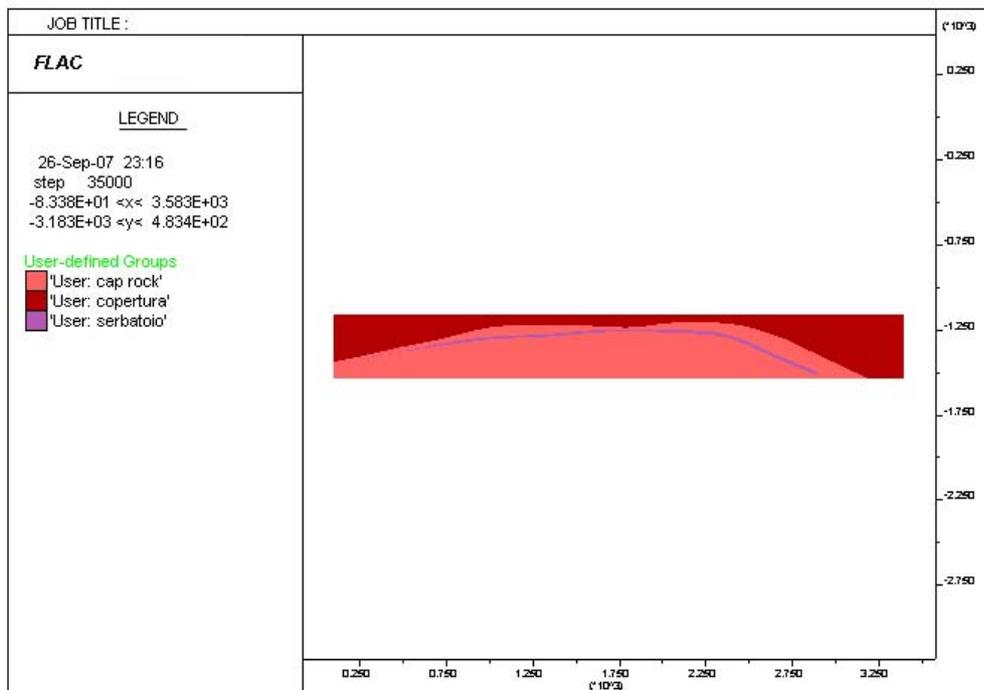


Fig. 5 - Geometria del modello numerico della sezione B-B'

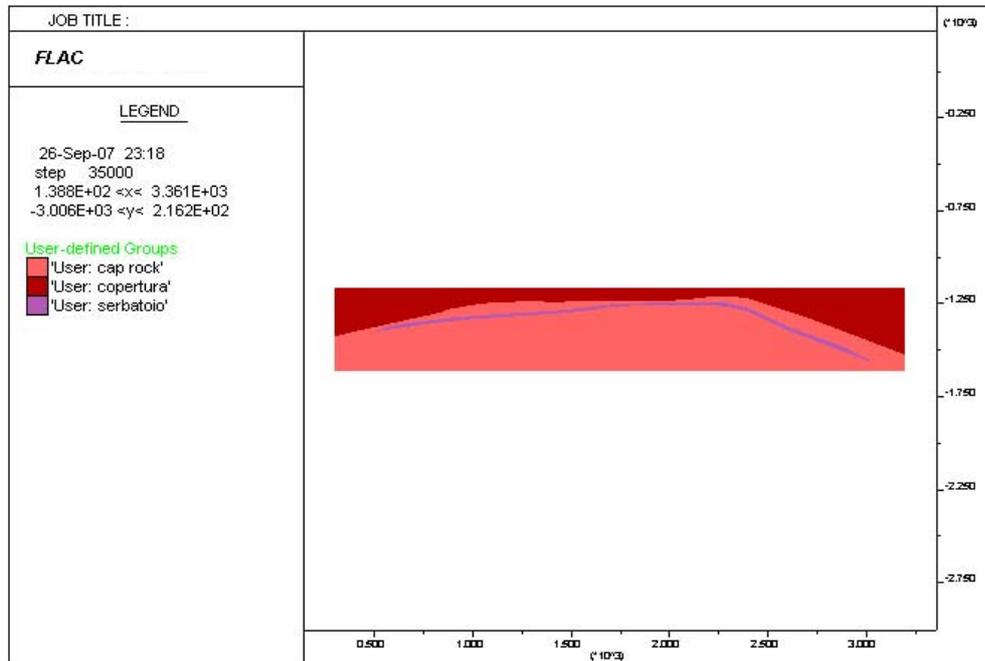


Fig. 6 - Geometria del modello numerico della sezione C-C'

4.4.2 Descrizione del procedimento di calcolo

Nel seguito è descritto il procedimento utilizzato per la simulazione numerica dell'effetto della pressione del gas in giacimento, valido per tutte le sezioni oggetto di studio. Le pressioni sulla superficie di contatto tra il giacimento e la *cap-rock* sono state simulate attraverso l'applicazione di una pressione pari alla differenza tra la pressione del gas nel giacimento e quella dell'acqua nella *cap-rock*.

Poiché i livelli superiori alla *cap-rock* sono considerati nel modello solo per un'estensione di poche decine di metri, la restante parte della colonna di roccia fino alla superficie è rappresentata applicando una pressione verticale omogenea, prodotta dal suo peso, sul bordo superiore del modello.

Le fasi della modellazione numerica disaccoppiata sono state:

1. Costruzione della griglia di elementi (dimensione di ciascuno di essi pari a 4 m x 2 m).
2. Definizione della legge di comportamento del terreno.
3. Definizione della geometria dei contatti:
 - * contorno del giacimento;
 - * interfaccia tra *cap-rock* e sedimenti soprastanti.
4. Definizione dei gruppi di elementi del modello:
 - * sedimenti;



- * *cap-rock*;
 - * giacimento.
5. Identificazione dei nodi sul contorno del giacimento.
 6. Definizione delle proprietà fisico-meccaniche dei materiali per ciascun gruppo di elementi.
 7. Inizializzazione delle tensioni verticali ed orizzontali litostatiche all'interno del modello.
 8. Assegnazione delle condizioni al contorno:
 - * spostamenti perpendicolari bloccati sul bordo inferiore e sul bordo sinistro;
 - * applicazione della tensione orizzontale (variabile in funzione della profondità) sul bordo destro.
 9. Applicazione di un carico verticale sul bordo superiore del modello per simulare la pressione litostatica fino alla quota di riferimento del modello.
 10. Inizializzazione della pressione interstiziale in tutti gli elementi del modello.
 11. Applicazione delle forze di filtrazione al contatto tra il serbatoio e la *cap-rock*, attraverso la definizione dei parametri che caratterizzano la condizione di stoccaggio del gas:
 - * pressione del gas;
 - * quota del contatto gas-acqua;
 - * densità del gas.

4.4.3 Analisi dei risultati dello studio disaccoppiato

L'analisi dei risultati è basata sulla valutazione dei fattori di sicurezza ottenuti dalla modellizzazione.

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

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

dove: c: coesione

φ : angolo d'attrito

σ_1 : tensione principale massima esistente

σ_3 : tensione principale minima esistente

σ_3' : tensione principale efficace minima esistente

$\sigma_{1,r}$: tensione principale massima a rottura

4.4.3.1 FASE A - Condizione iniziale con $p_i = 15.2 \text{ MPa}$

Le figure 7 – 9 illustrano, per ogni sezione indagata, l'andamento generale del fattore di sicurezza nei confronti della rottura della roccia nella condizione originaria ($p = p_i = 15.2 \text{ MPa}$).

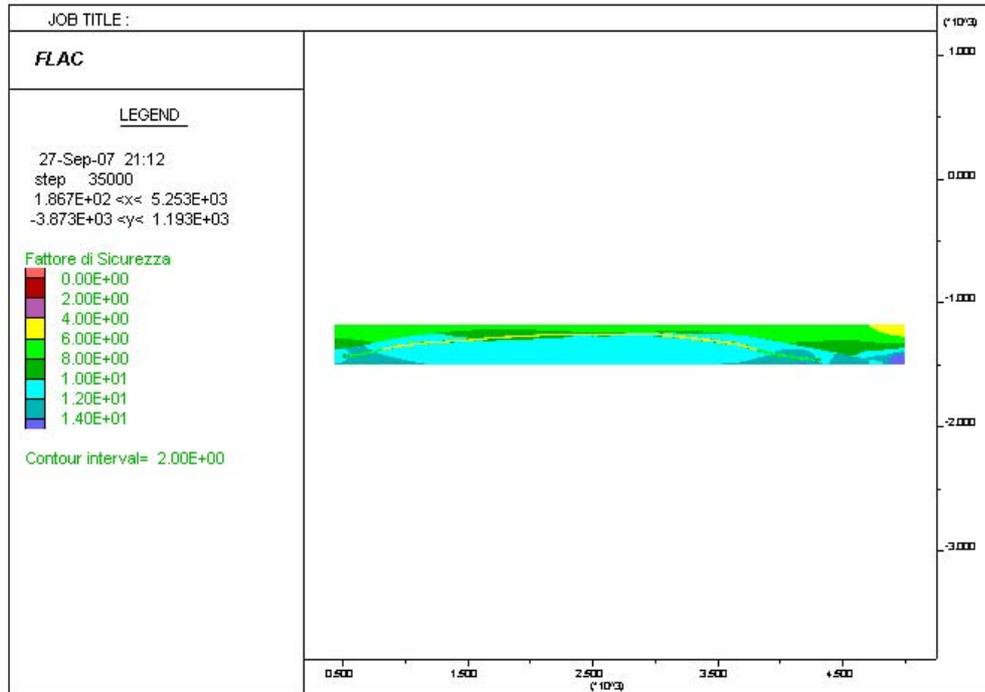


Fig. 7 - Fattori di sicurezza nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione A-A'

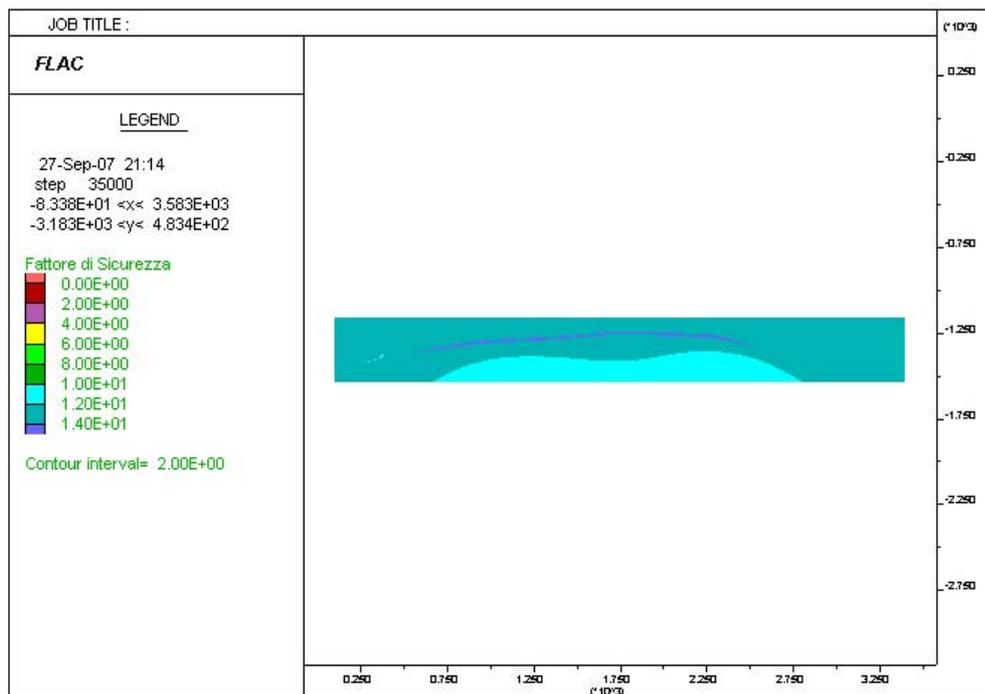


Fig. 8 - Fattori di sicurezza nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione B-B'

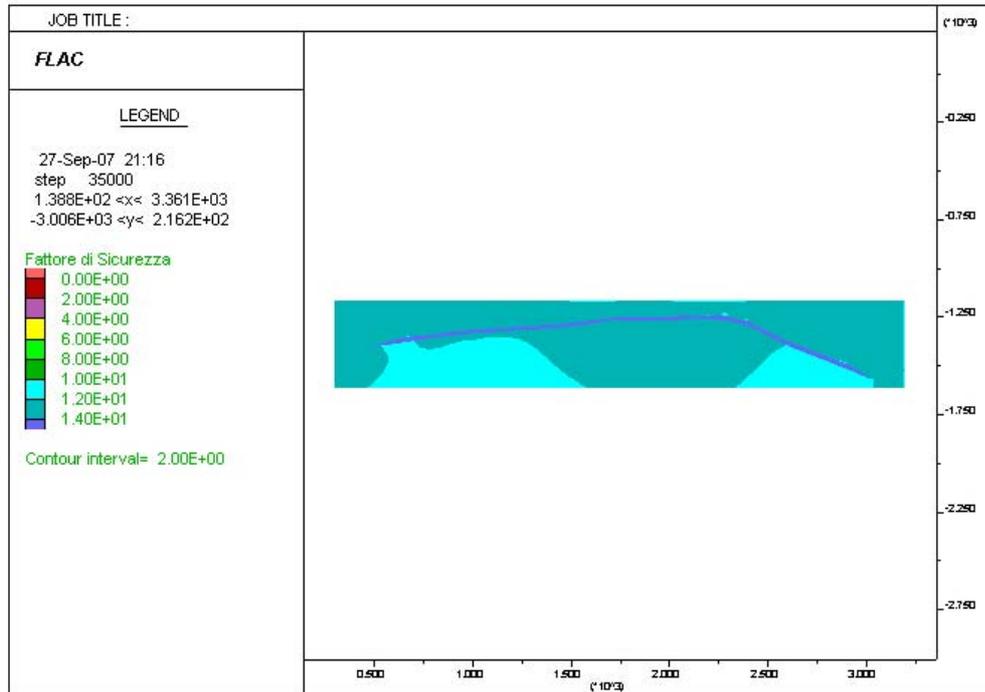


Fig. 9 - Fattori di sicurezza nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione C-C'

Da una verifica di maggior dettaglio si rileva che i valori minori del fattore di sicurezza nella *cap-rock* si manifestano nella Sezione A-A', in corrispondenza della porzione centrale del giacimento, dove lo spessore della *cap-rock* è minimo.

Nel seguito sono riportati, per le tre sezioni, i valori di dettaglio dei fattori di sicurezza e delle tensioni nelle zone dove si è registrato il minimo dei fattori di sicurezza nella *cap-rock*.

Nella tabella 4 sono riportati i fattori di sicurezza minimi individuati per ciascuna delle 3 sezioni analizzate.

Tab. 4: Fattori di sicurezza minimi determinati nella *cap-rock* per $p = p_i$

	FS minimi nella <i>cap-rock</i> Fase A ($p=p_i$)
<i>SEZIONE A-A'</i>	7.5
<i>SEZIONE B-B'</i>	9.5
<i>SEZIONE C-C'</i>	11.8

Nelle fig. 10 – 12 sono illustrati gli andamenti del fattore di sicurezza in corrispondenza delle zone più critiche di ciascuna sezione esaminata.

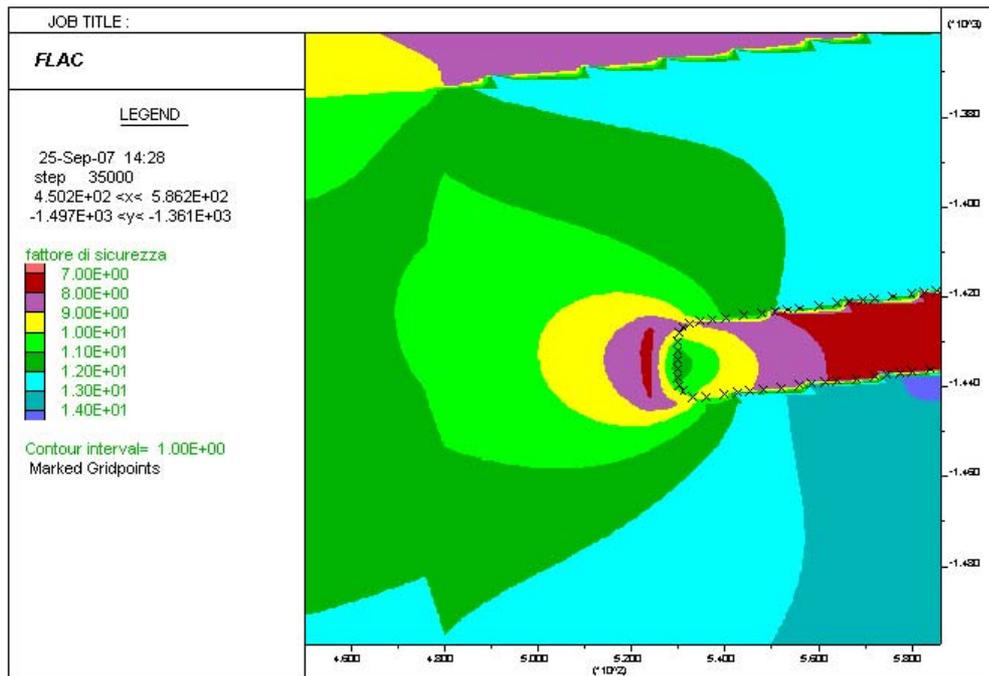


Fig. 10 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione A-A' (zona ovest del giacimento)

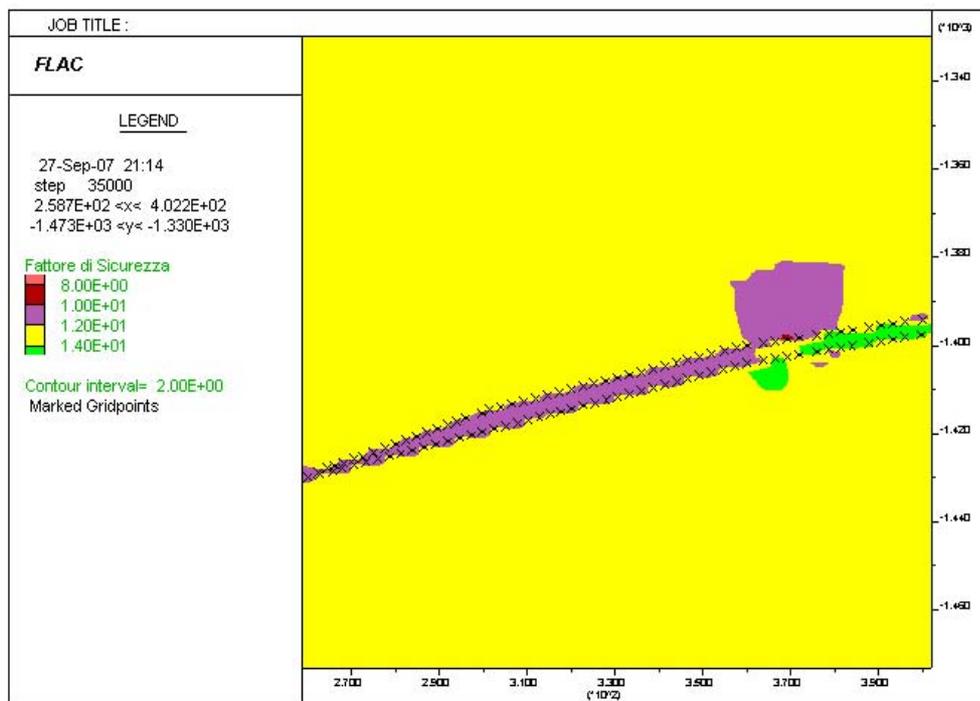


Fig. 11 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione B-B' (zona sud del giacimento)

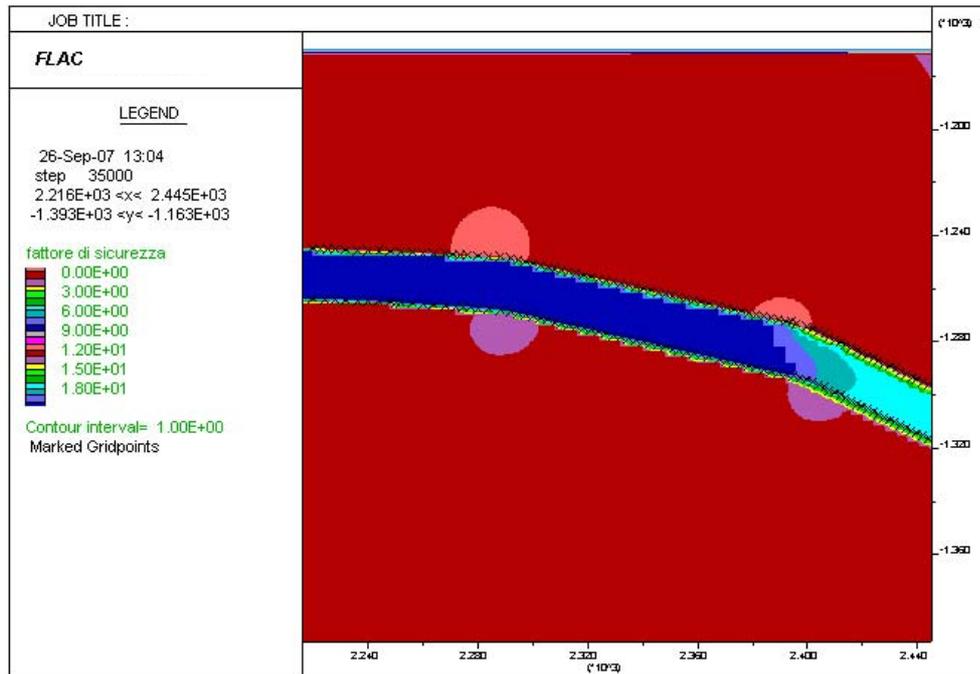


Fig. 12 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione C-C' (zona di culmine del giacimento)

Per quanto riguarda lo stato tensionale nella *cap-rock*, si rileva come nelle condizioni iniziali le tensioni orizzontali efficaci siano sempre di compressione e comprese tra 8 e 15.6 MPa. Quelle verticali efficaci sono invece comprese tra 12.50 e 14.25 MPa.

Il dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci e delle tensioni verticali efficaci maggiori rilevate in corrispondenza di ciascuna delle sezioni esaminate è riportato rispettivamente nelle fig. 13 – 15 e nelle fig. 16 - 19.

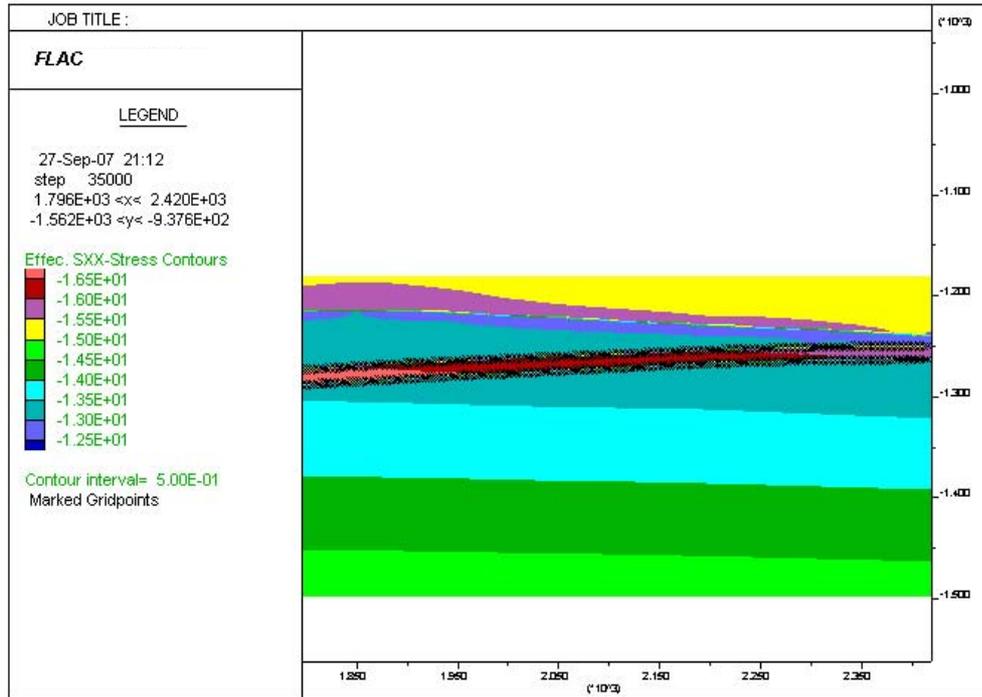


Fig. 13 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione A-A' (parte centrale del giacimento)

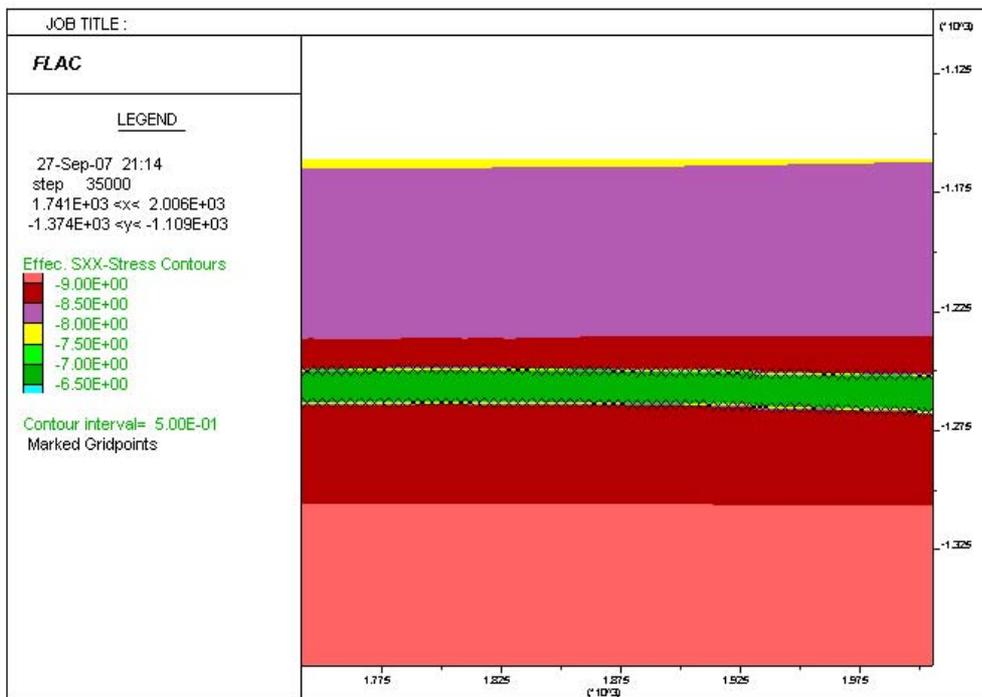


Fig. 14 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione B-B' (parte centrale del giacimento)

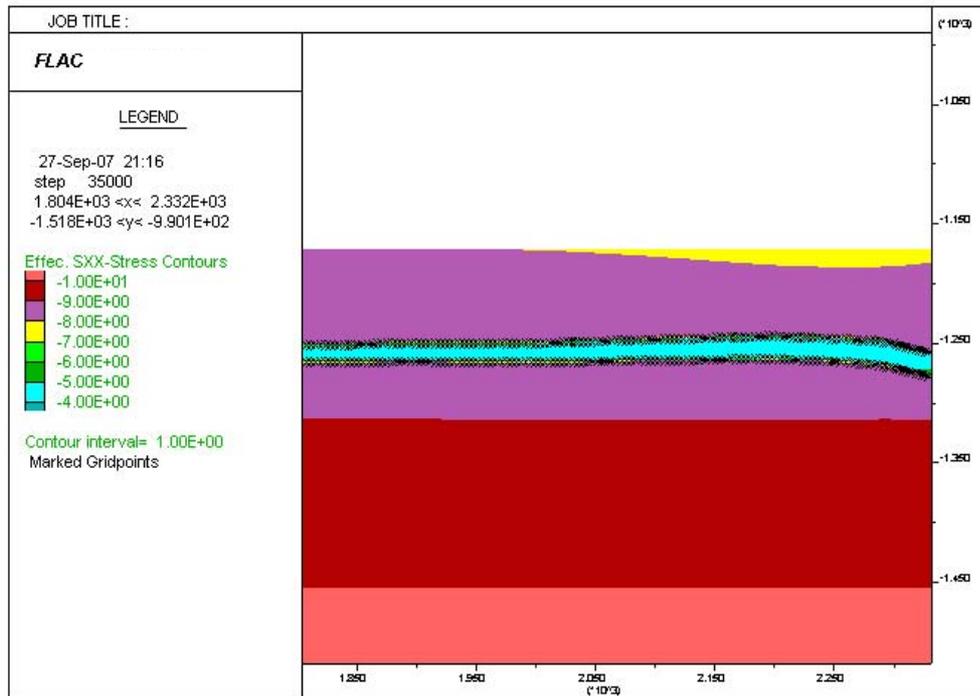


Fig. 15 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione C-C' (parte centrale del giacimento)

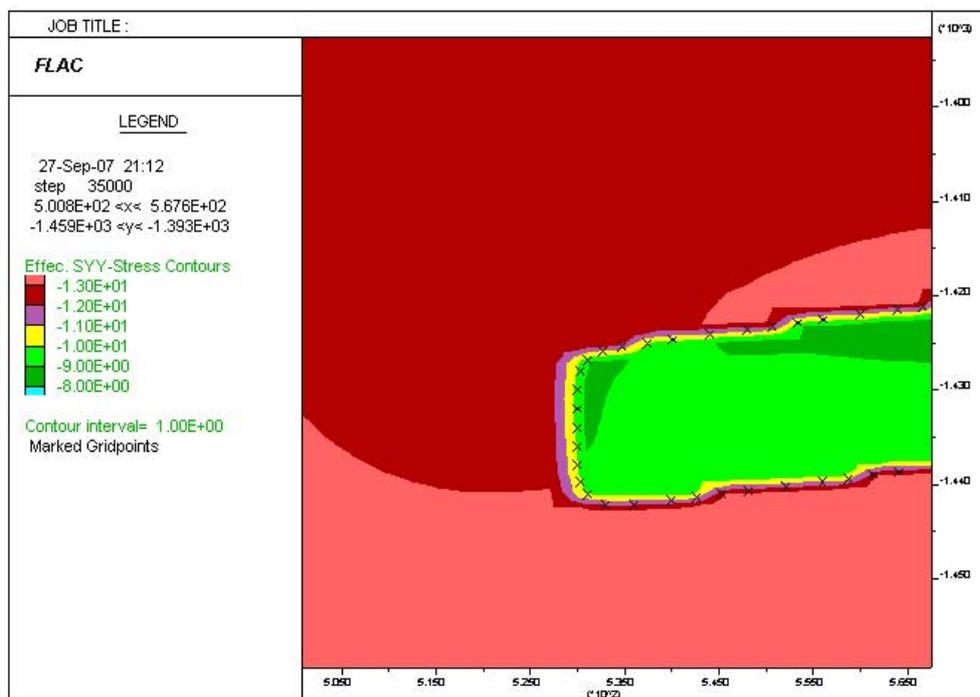


Fig. 16 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione A-A' (zona ovest del giacimento)

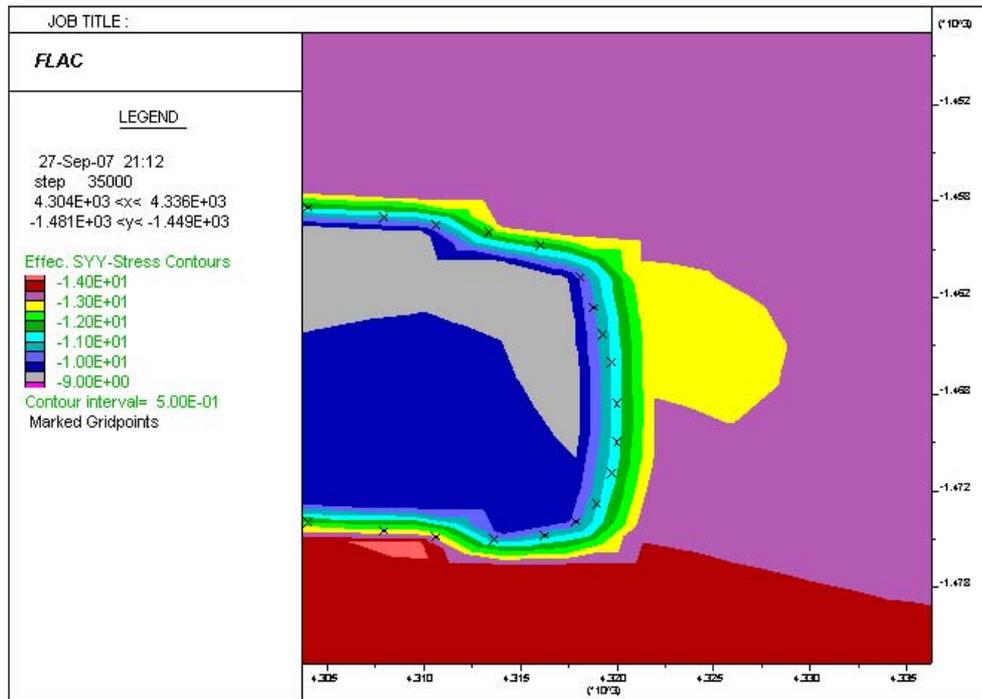


Fig. 17 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione A-A' (zona est del giacimento)

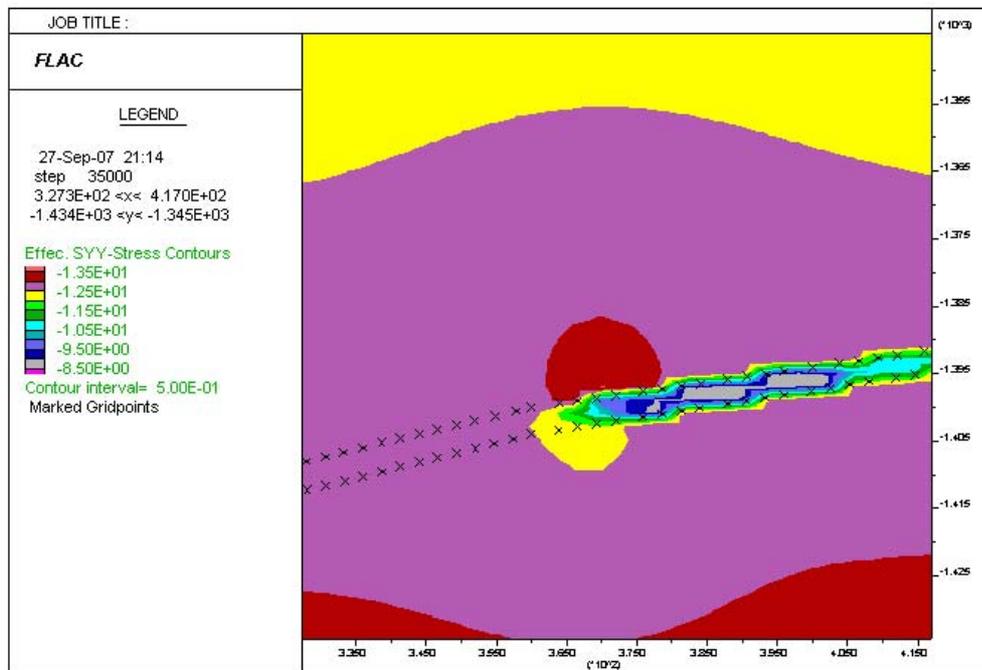


Fig. 18 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione B-B' (zona sud del giacimento)

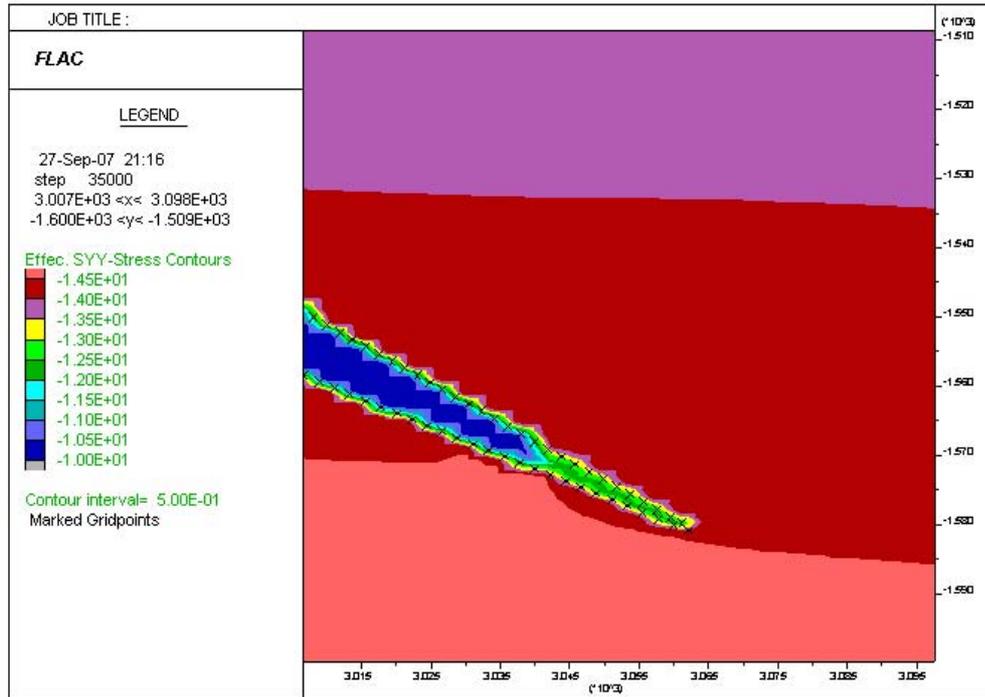


Fig. 19 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci nella condizione iniziale di pressione ($p = p_i$) – Sezione C-C' (zona nord del giacimento)

4.4.3.2 FASE B - Condizione di stoccaggio del gas a $p = 1.1 p_i$ ($p_{110\%} = 16.72 \text{ MPa}$)

Per le tre sezioni oggetto di studio l'analisi è proseguita ipotizzando che il valore massimo di pressione raggiunto dal gas durante la fase di invaso fosse pari al 110% della pressione iniziale ($p_{110\%} = 16.72 \text{ MPa}$). Nel seguito sono riportati i risultati ottenuti dal calcolo. Come si può osservare dalle fig. 20 - 22 e come riepilogato nella tabella 5, il valore dei fattori di sicurezza minimi nella *cap-rock* si riduce leggermente rispetto alla situazione originaria nelle tre sezioni considerate.

Nella *cap-rock* le tensioni efficaci verticali (vedasi fig. 23 – 25) e orizzontali (vedasi fig. 26 – 28) non subiscono variazioni rilevanti, restando rispettivamente comprese tra 8 e 15.60 MPa e tra 11.0 e 13.0 MPa.

Tab. 5: Fattori di sicurezza minimi nella *cap-rock* determinati per $p = 1.1 p_i$

	FS minimi nella <i>cap-rock</i> Fase B ($p=1.1 \cdot p_i$)
SEZIONE A-A'	7.1
SEZIONE B-B'	8.3
SEZIONE C-C'	11.4

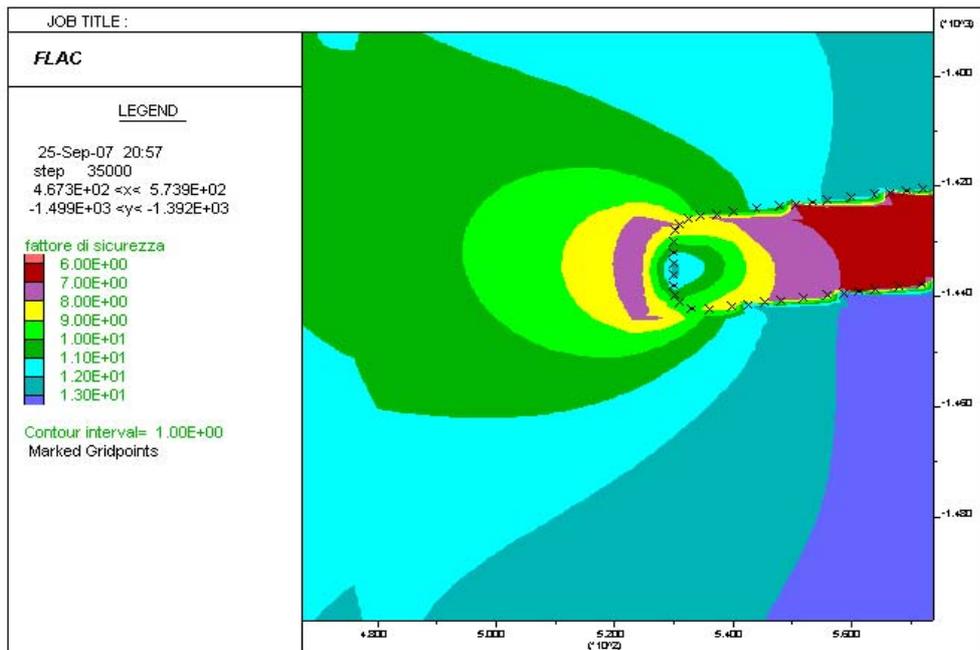


Fig. 20 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella fase B – Sezione A-A' (zona ovest del giacimento)

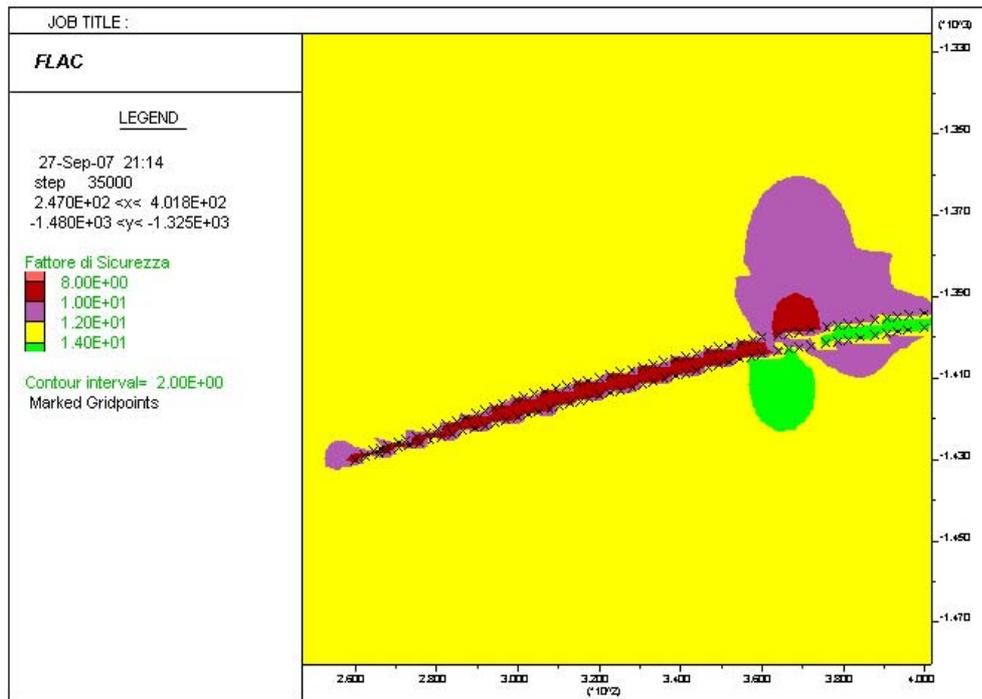


Fig. 21 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella fase B – Sezione B-B' (zona sud del giacimento)

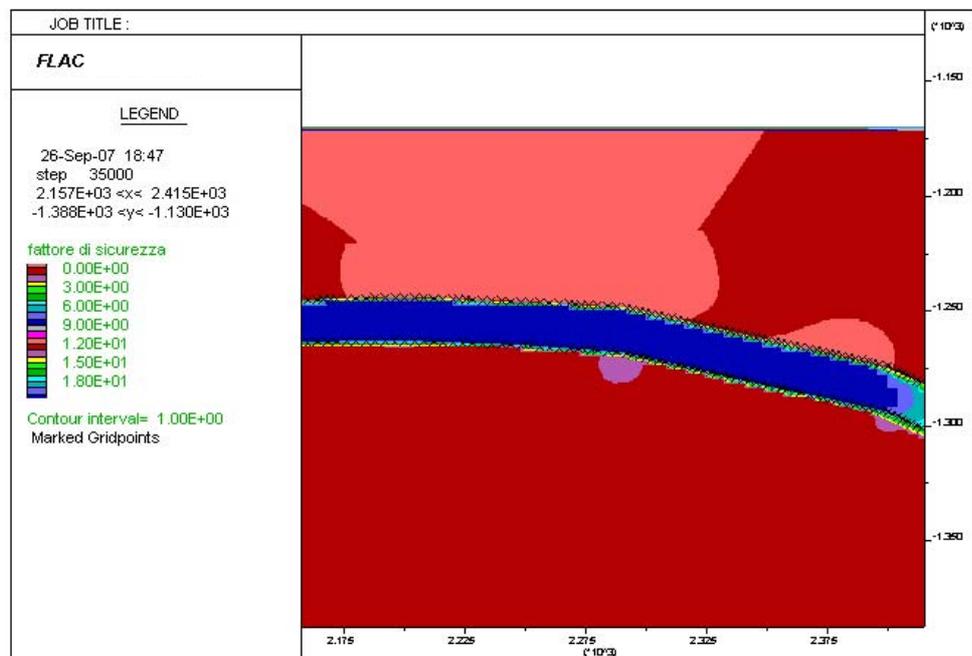


Fig. 22 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella fase B – Sezione C-C' (zona di culmine del giacimento)

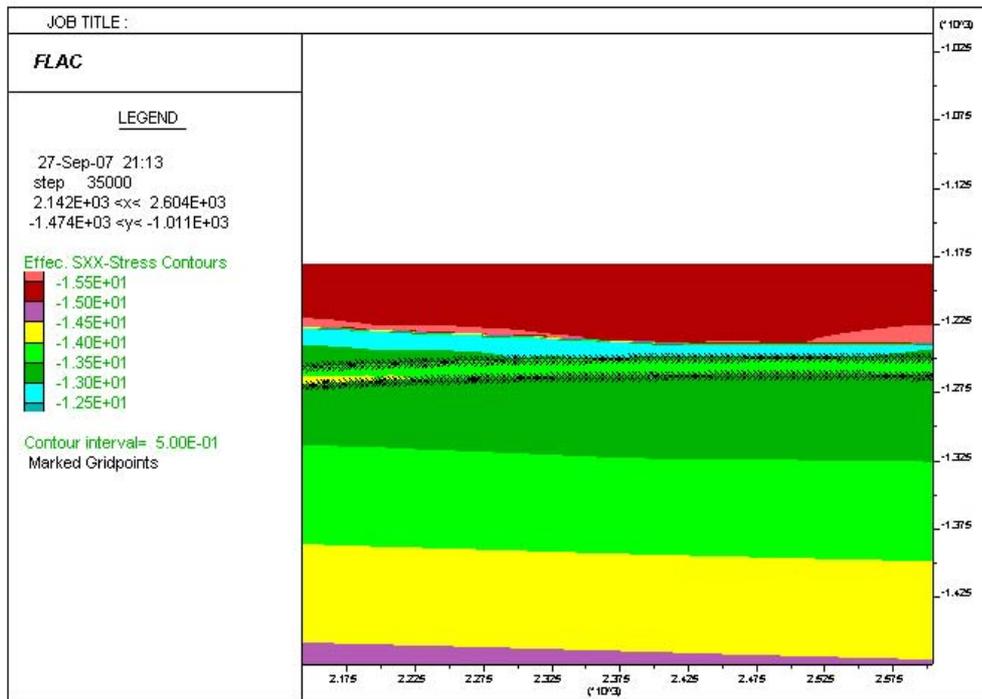


Fig. 23 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci fase B – Sezione A-A' (zona centrale del giacimento)

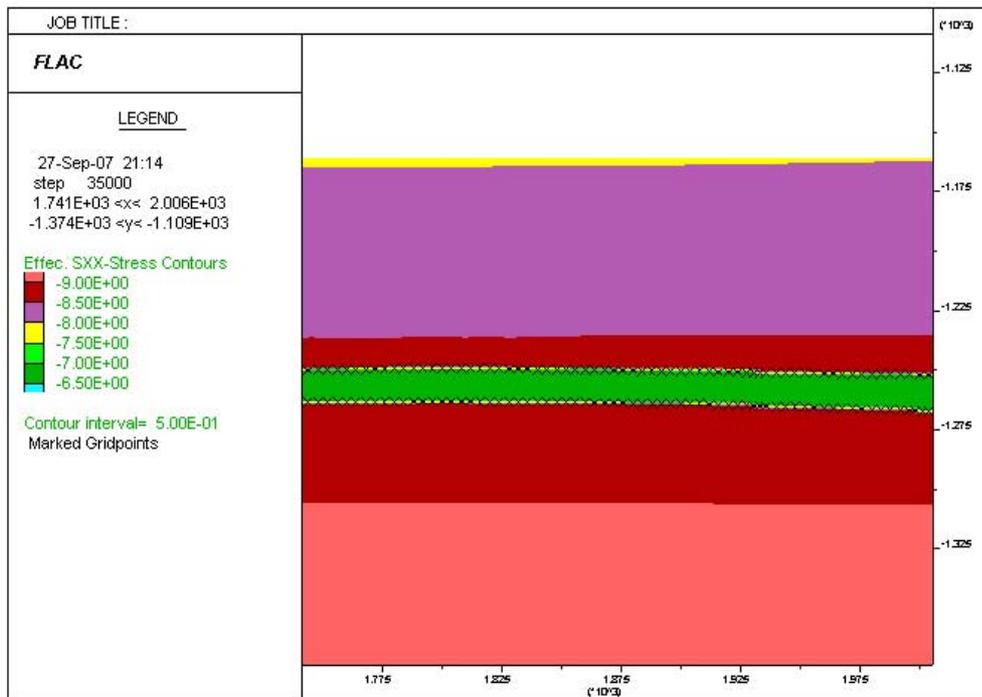


Fig. 24 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci fase B – Sezione B-B' (zona di culmine del giacimento)

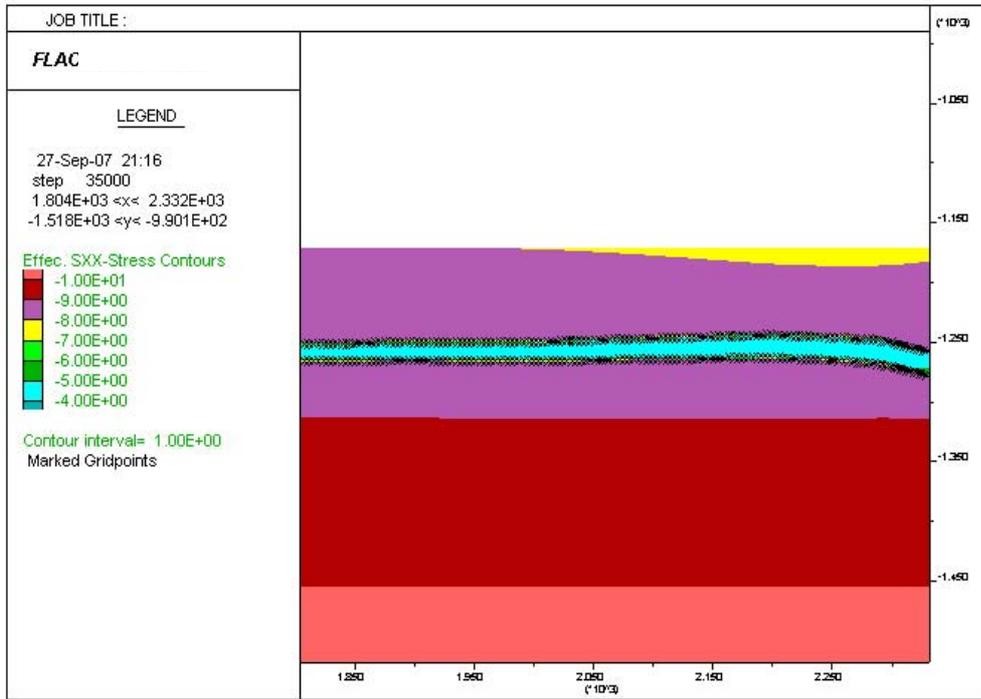


Fig. 25 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci fase B – Sezione C-C' (zona centrale del giacimento)

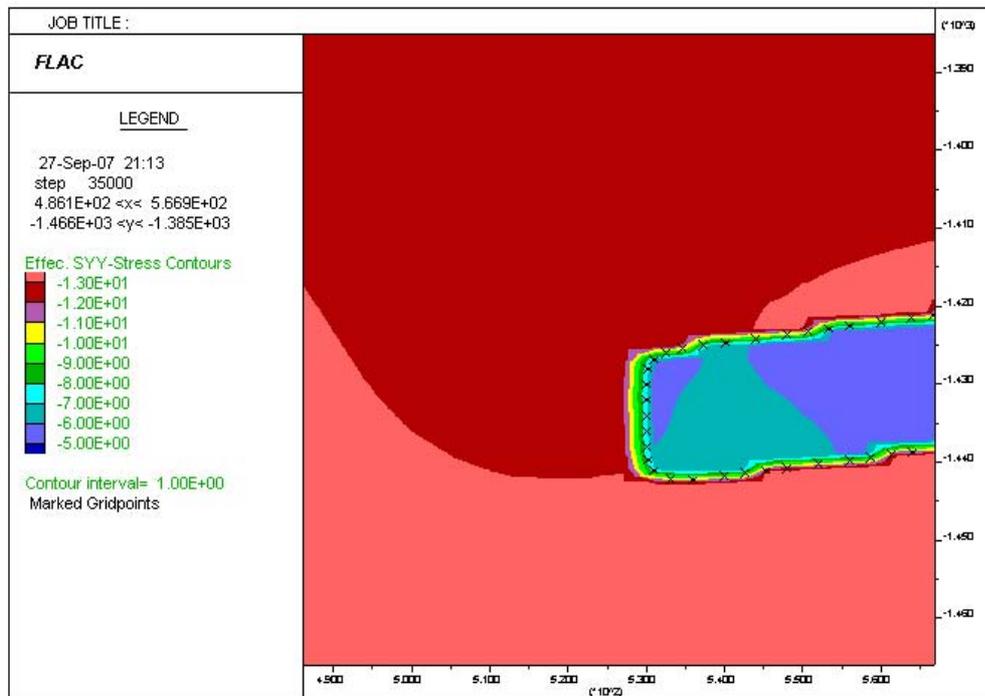


Fig. 26 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase B – Sezione A-A' (zona ovest del giacimento)

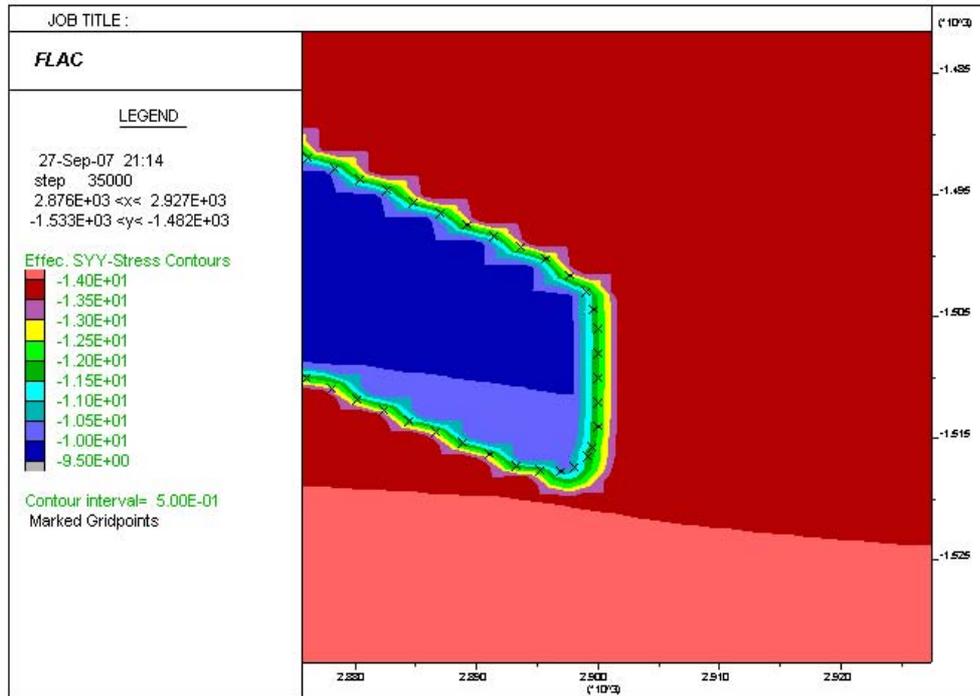


Fig. 27 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase B – Sezione B-B' (zona nord del giacimento)

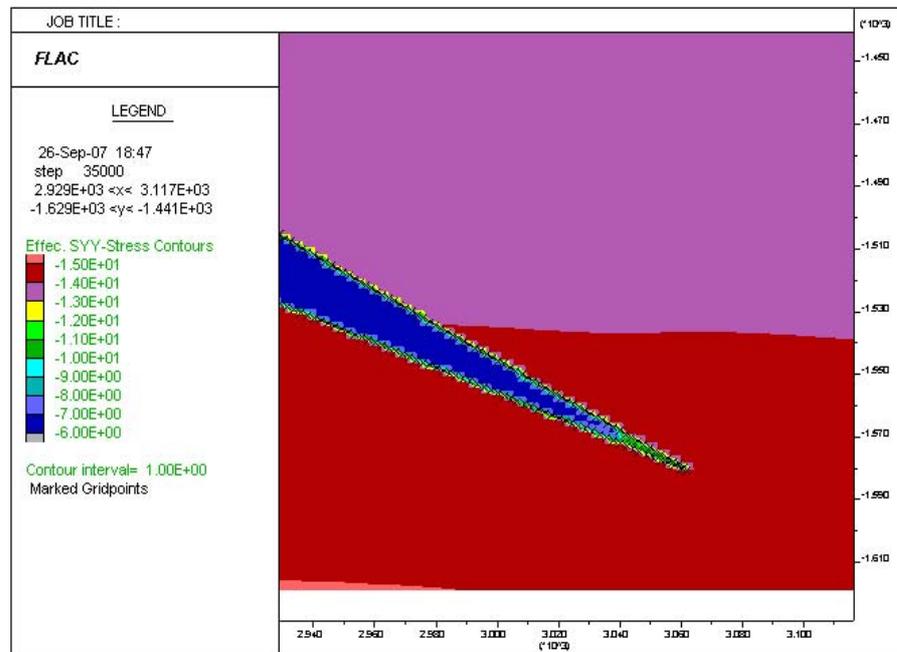


Fig. 28 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase B – Sezione C-C' (zona nord del giacimento)

4.4.3.3 FASE C - Condizione di stoccaggio del gas a $p = 1.3 p_i$ ($p_{130\%} = 19.76 \text{ MPa}$)

Per le tre sezioni oggetto di studio si è poi analizzata la condizione di stoccaggio del gas ad una pressione massima pari al 130% della pressione iniziale ($p_{130\%} = 19.76 \text{ MPa}$). Nel seguito sono riportati i risultati ottenuti dal calcolo. Come si può osservare dalle figure 29 – 31 e dal confronto con le tabelle 4 e 5, all'aumentare della pressione del gas i fattori di sicurezza valutati in corrispondenza della *cap-rock* si riducono (vedasi tabella 6) e, in particolare, la riduzione risulta più marcata lungo la sezione B-B'. I valori minimi risultano, comunque, essere superiori a 6 in tutte le sezioni analizzate.

Tab. 6: Fattori di sicurezza minimi nella *cap-rock* determinati per $p = 1.3 p_i$

	FS minimi nella <i>cap-rock</i> Fase C ($p=1.3 \cdot p_i$)
SEZIONE A-A'	6.3
SEZIONE B-B'	6.7
SEZIONE C-C'	10.6

Nella *cap-rock* la tensione orizzontale efficace varia da un valore minimo di 8.5 MPa nelle sezioni B-B' e C-C' a un valore massimo di 12.5 MPa nella sezione A-A' (vedasi fig. 32 – 34); quella verticale varia da 5 MPa sul margine ovest della sezione A-A' a 14 MPa sul margine nord della sezione C-C' (vedasi fig. 35 – 40).

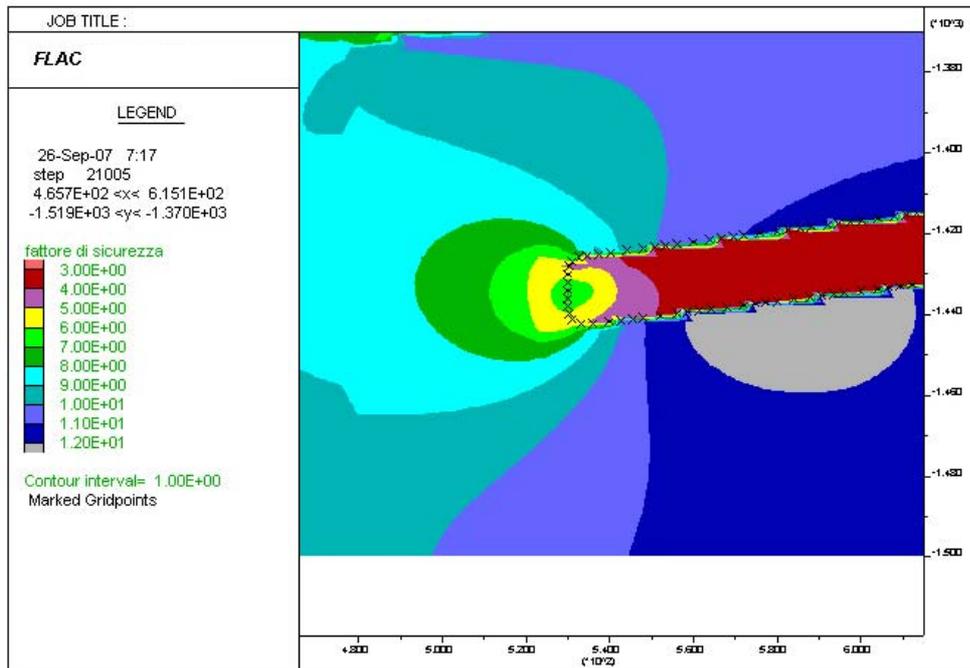


Fig. 29 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella fase C – Sezione A-A' (zona ovest del giacimento)

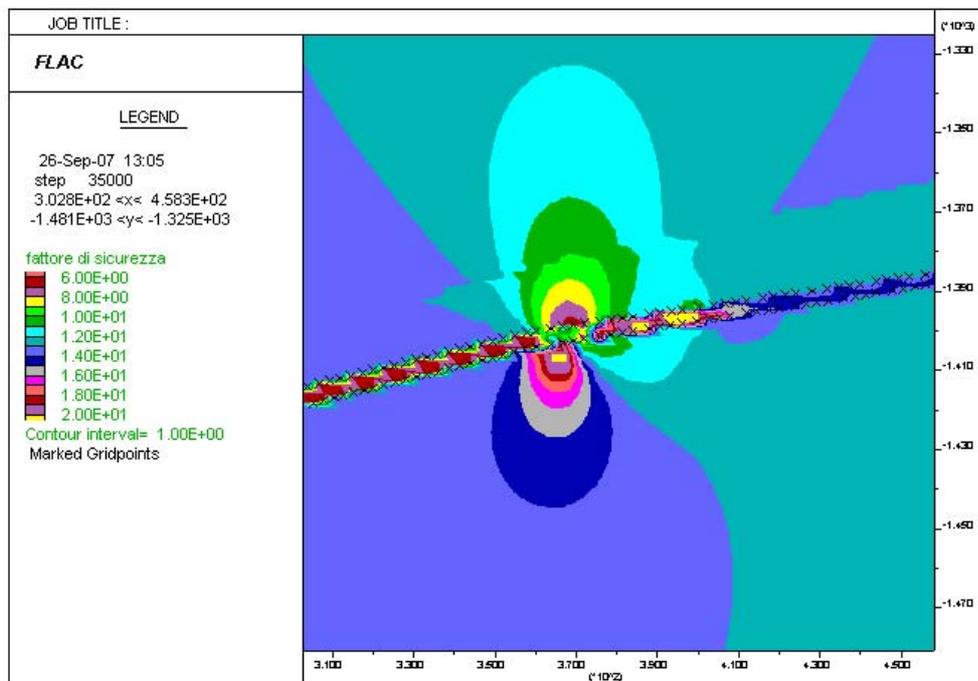


Fig. 30 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella fase C – Sezione B-B' (zona ovest del giacimento)

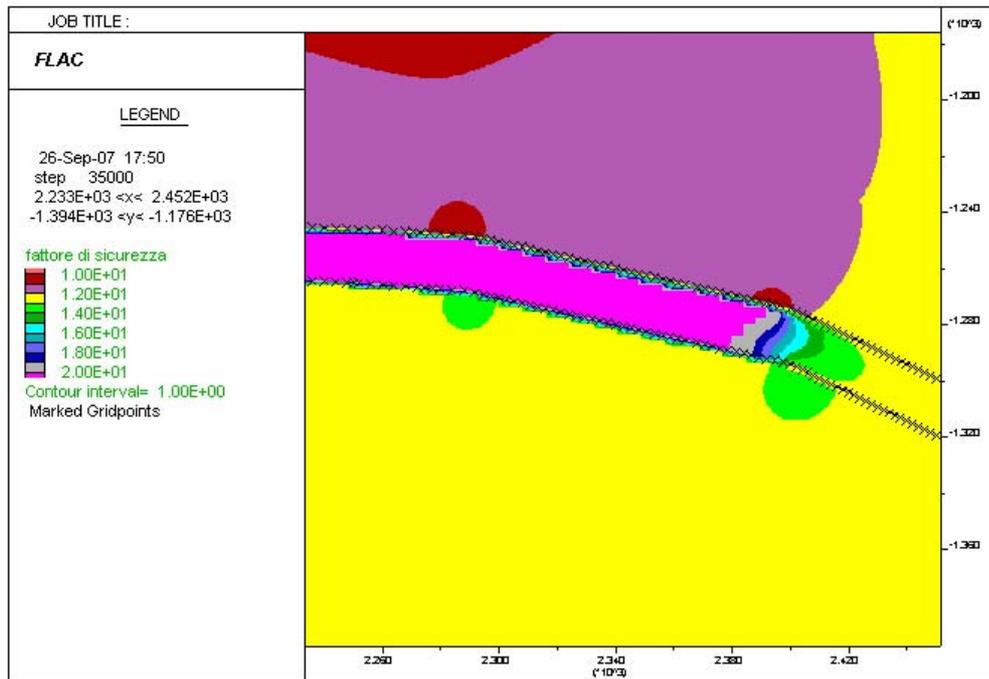


Fig. 31 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella fase C – Sezione C-C' (zona centrale del giacimento)

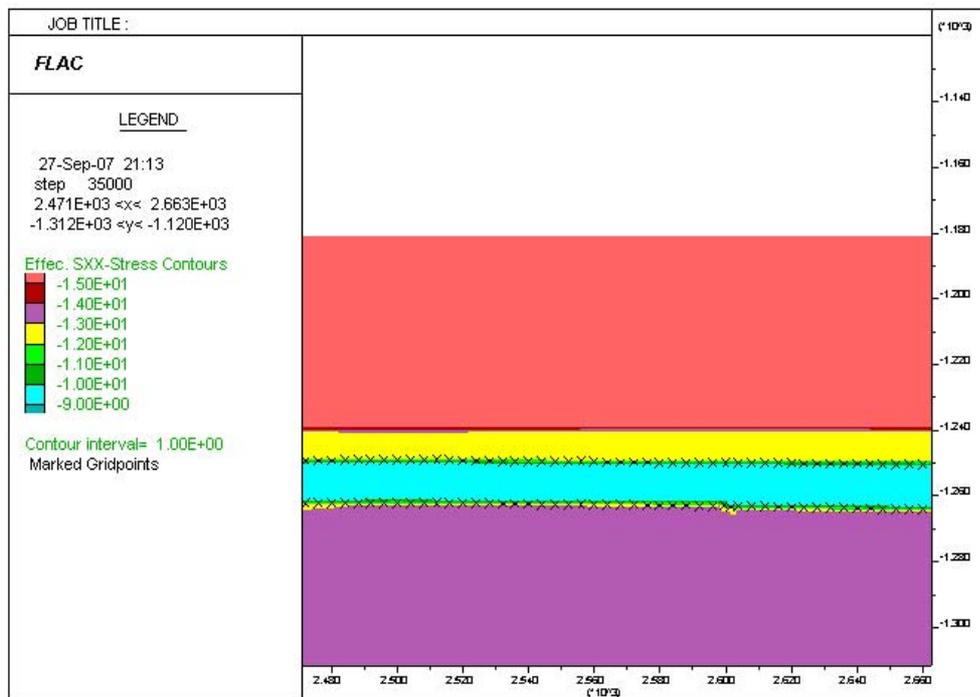


Fig. 32 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci fase C – Sezione A-A' (zona di culmine del giacimento)

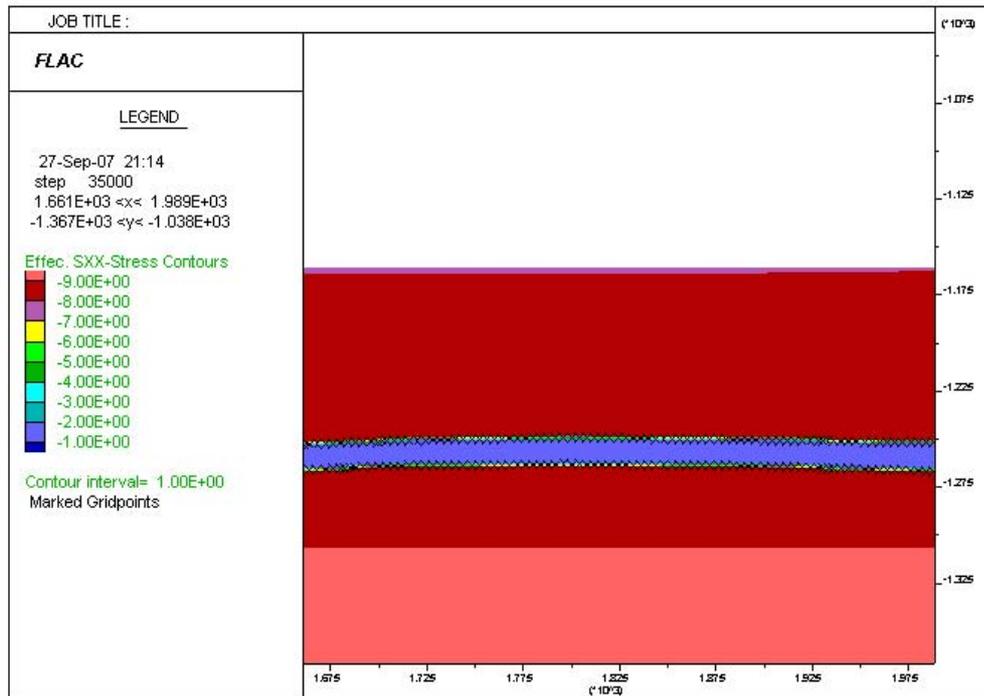


Fig. 33 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci fase C – Sezione B-B' (zona di culmine del giacimento)

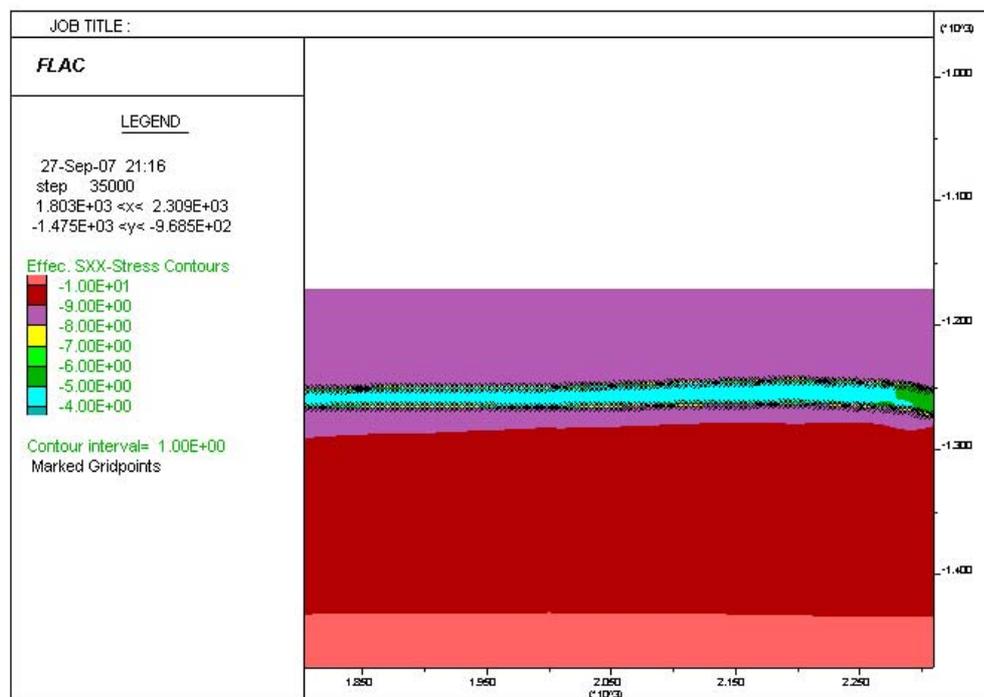


Fig. 34 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci fase C – Sezione C-C' (zona centrale del giacimento)

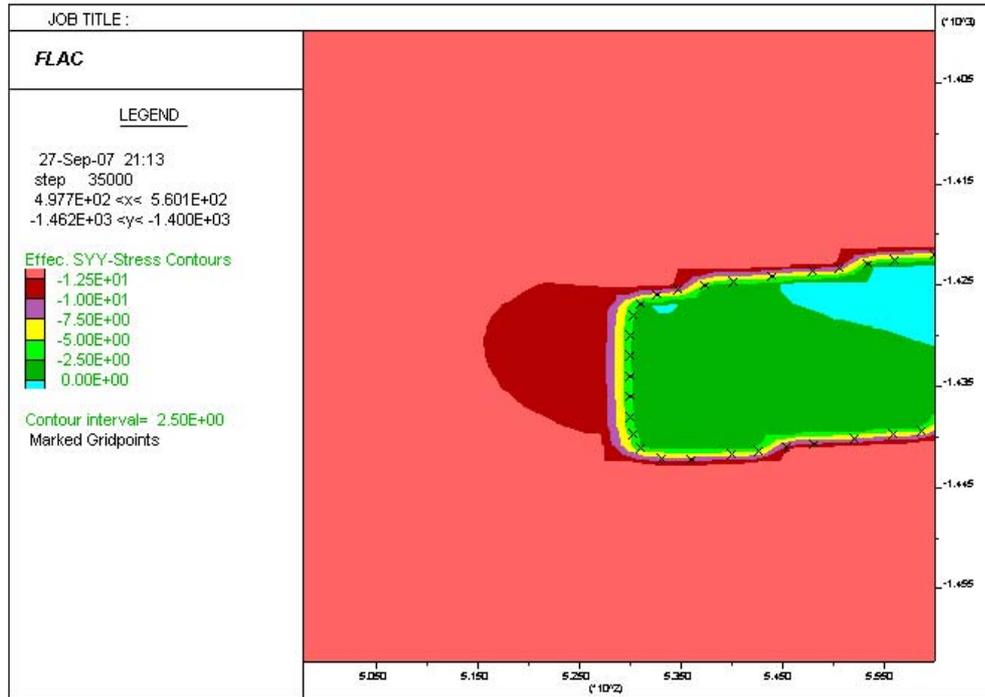


Fig. 35 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase C – Sezione A-A' (zona ovest del giacimento)

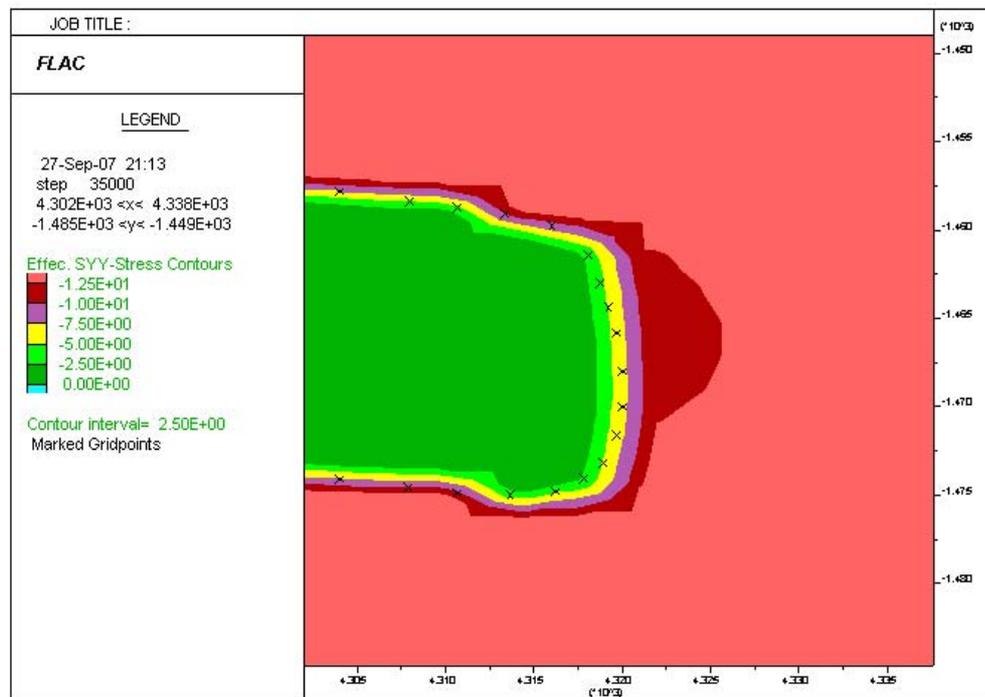


Fig. 36 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase C – Sezione A-A' (zona est del giacimento)

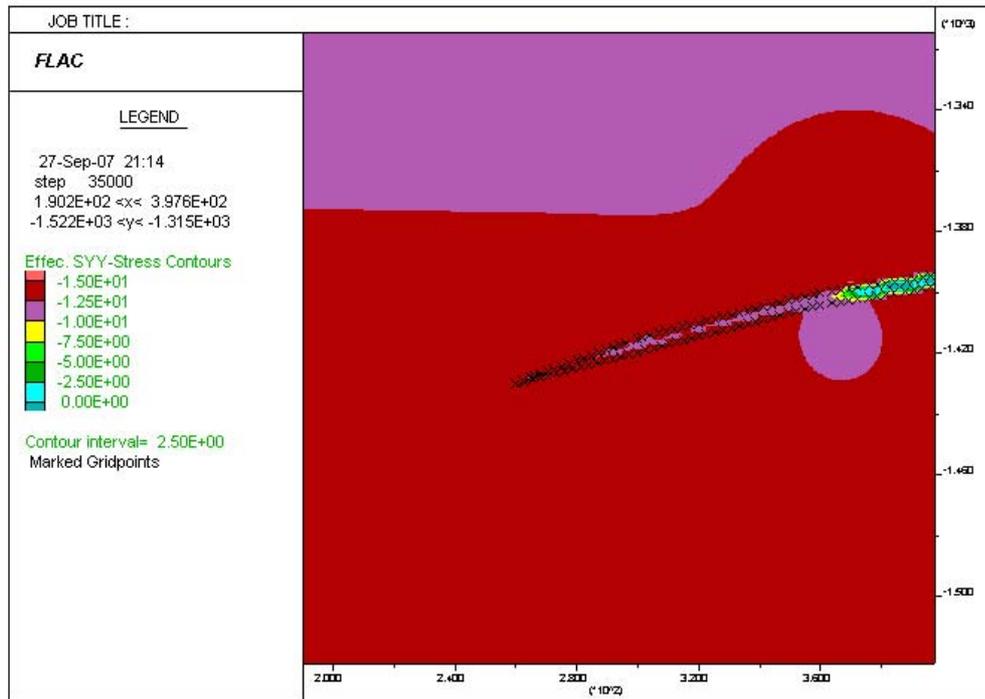


Fig. 37 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase C – Sezione B-B' (zona sud del giacimento)

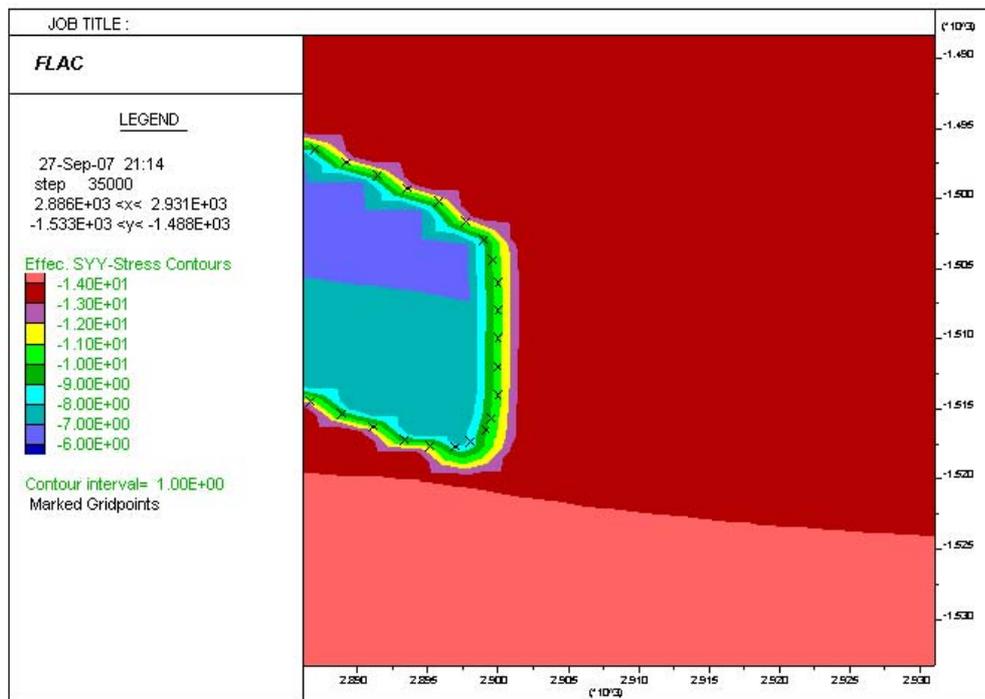


Fig. 38 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase C – Sezione B-B' (zona nord del giacimento)

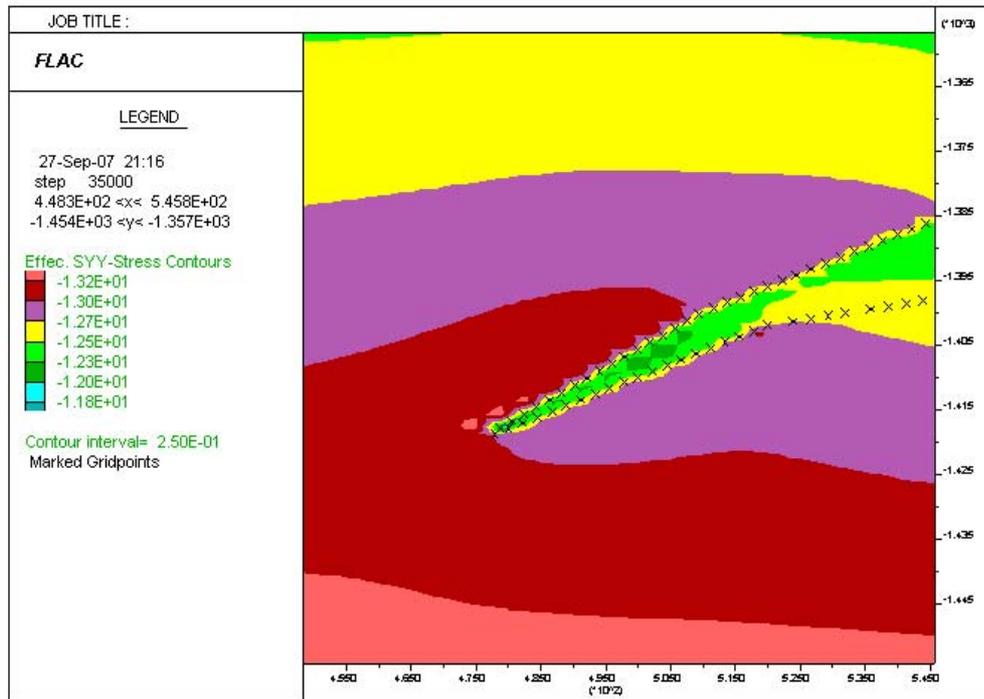


Fig. 39 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase C – Sezione C-C' (zona sud del giacimento)

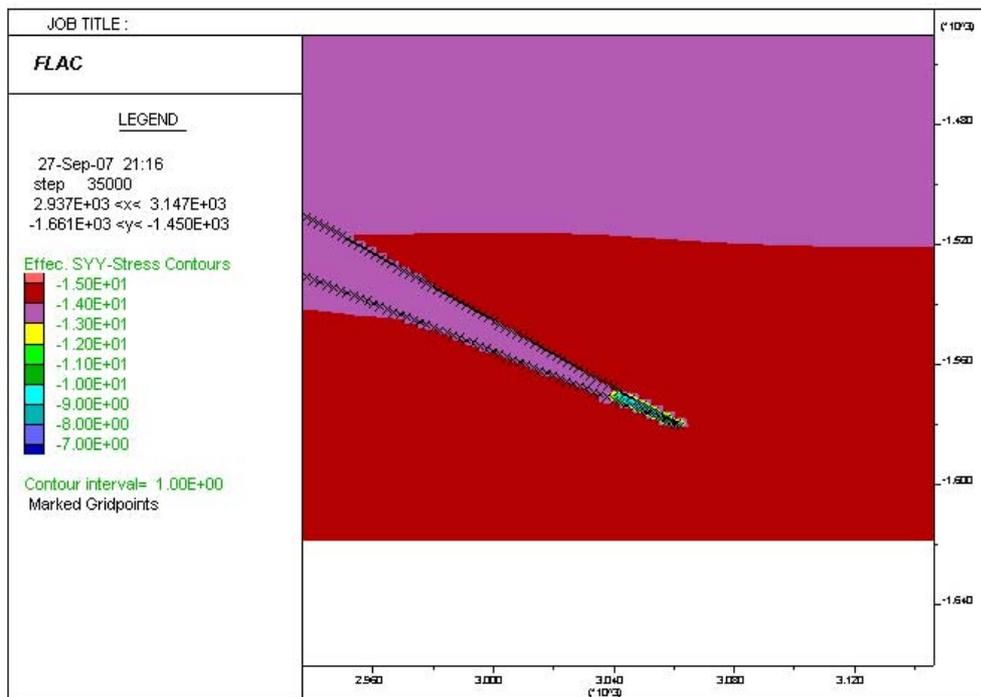


Fig. 40 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase C – Sezione C-C' (zona nord del giacimento)



4.4.3.4 FASE D - Condizione di stoccaggio del gas a $p = 1.5 p_i$ ($p_{150\%} = 22.8 \text{ MPa}$)

Per le stesse sezioni si è infine eseguita l'analisi geomeccanica ipotizzando che la pressione di stoccaggio del gas raggiungesse un valore massimo pari al 150% della pressione iniziale ($p_{150\%} = 22.8 \text{ MPa}$).

Come si può osservare dalle figure 41 – 43 e in base ai valori riepilogati nella tabella 7, i fattori di sicurezza minimi nella *cap-rock*, anche se inferiori rispetto alla fase precedente, risultano sempre superiori a 5. La sezione C-C' è quella che presenta fattori di sicurezza più elevati nella *cap-rock*, mentre la sezione B-B' quella che risulta avere un andamento del fattore di sicurezza minimo più influenzato dalla pressione del gas.

Nella *cap-rock* la tensione orizzontale efficace subisce un ulteriore lieve decremento, pur rimanendo sempre di compressione, e raggiunge il valore minimo di 7.5 MPa nella sezione C-C' (vedasi fig. 44 – 46); quella verticale varia tra un minimo di 2.5 MPa nella sezione A-A' ad un massimo di 13.75 nelle sezioni B-B' e C-C' (vedasi fig. 47 – 52).

Tab. 7: Fattori di sicurezza minimi nella *cap-rock* determinati per $p = 1.5 p_i$

	FS minimi nella <i>cap-rock</i> Fase D ($p=1.5 \cdot p_i$)
SEZIONE A-A'	5.6
SEZIONE B-B'	5.8
SEZIONE C-C'	9.4

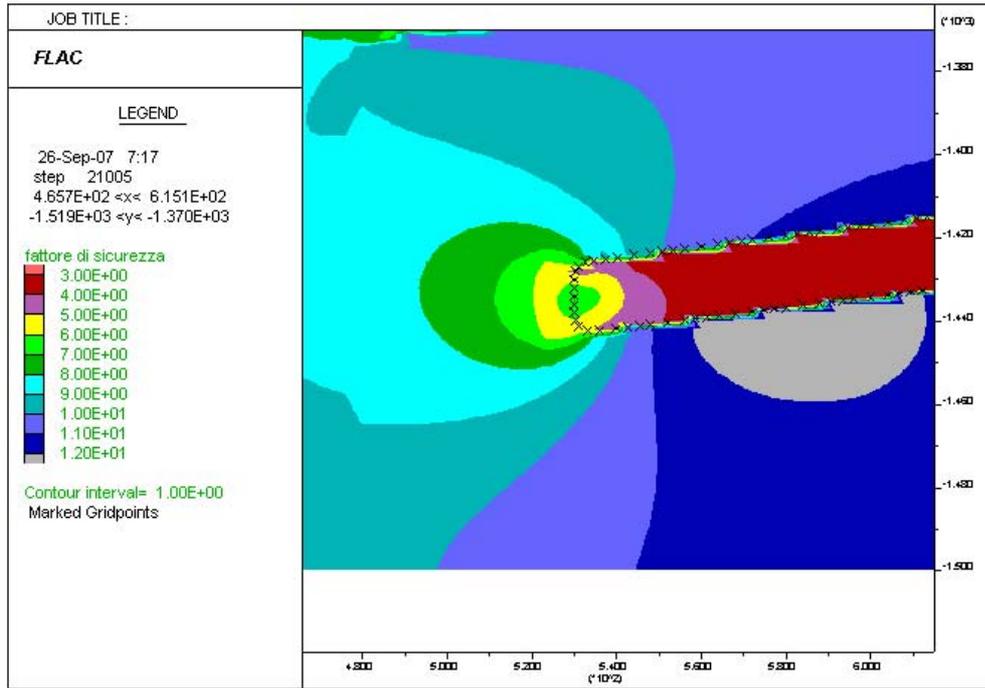


Fig. 41 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella fase D – Sezione A-A' (zona ovest del giacimento)

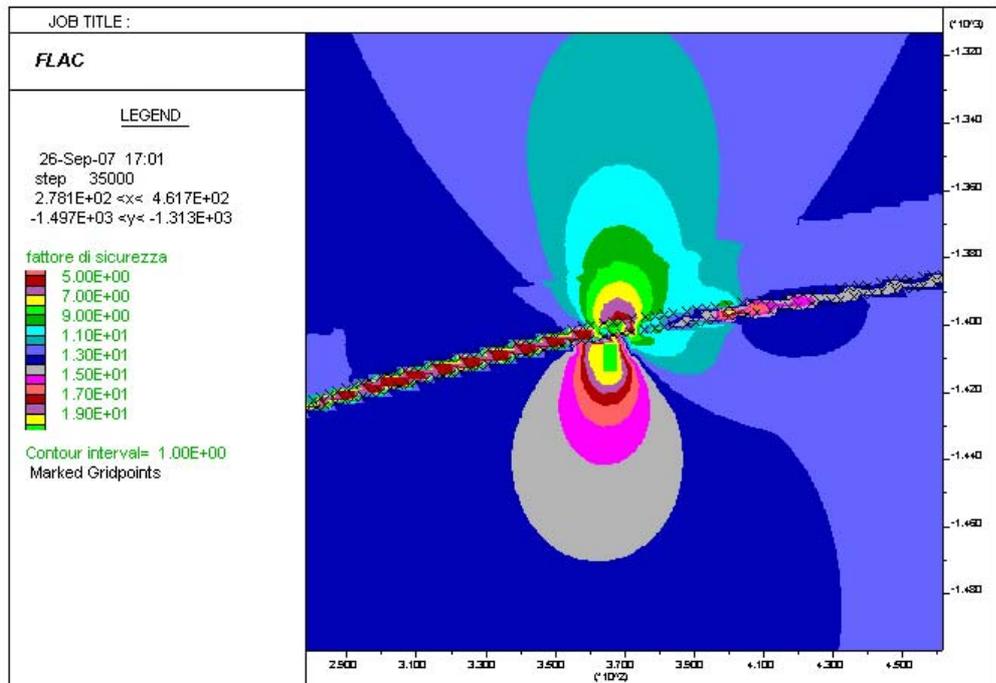


Fig. 42 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella fase D – Sezione B-B' (zona sud del giacimento)

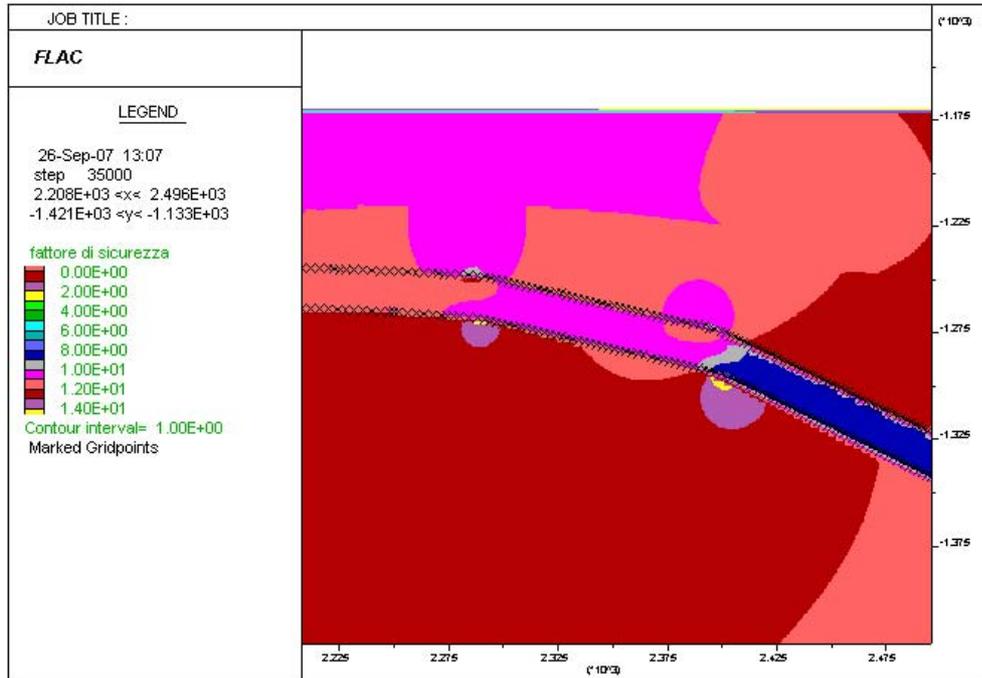


Fig. 43 - Dettaglio dei fattori di sicurezza nella fase D – Sezione C-C' (zona nord del giacimento)

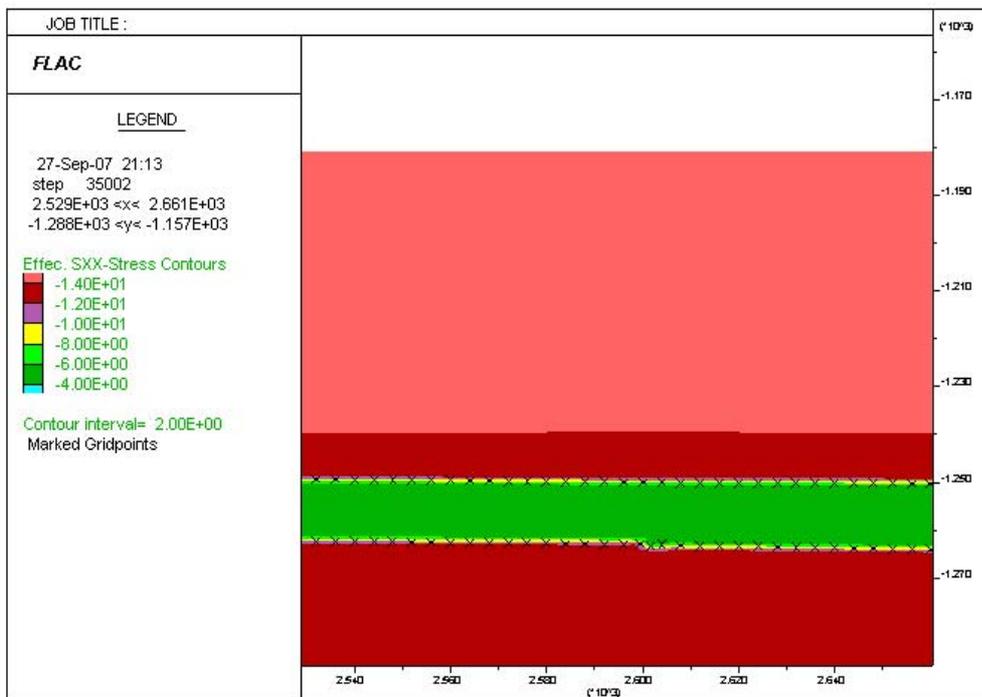


Fig. 44 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci nella fase D – Sezione A-A' (zona ovest del giacimento)

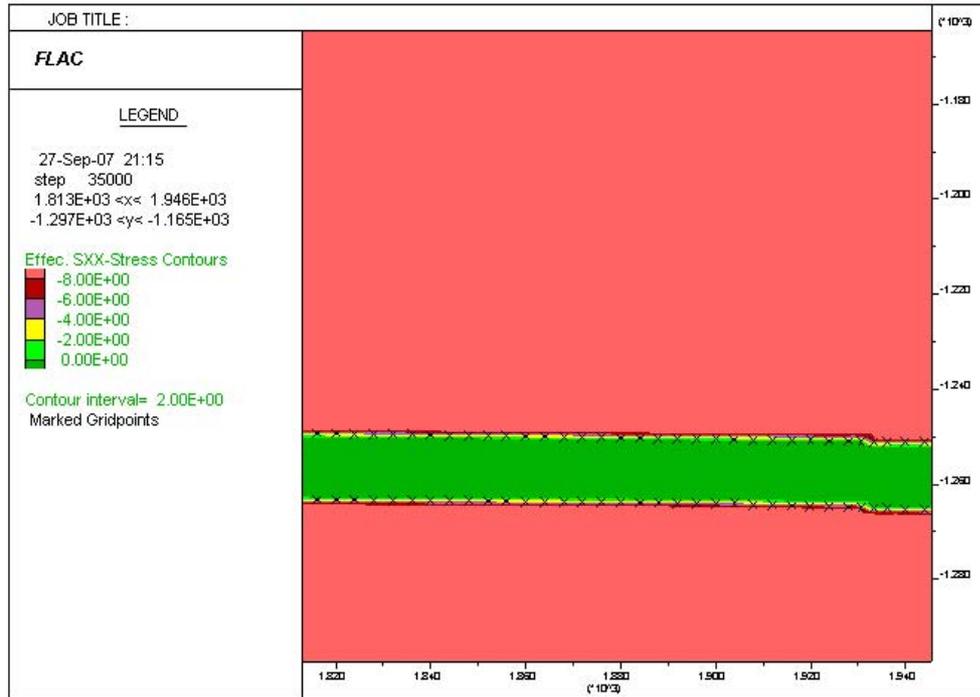


Fig. 45 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci nella fase D – Sezione B-B' (zona sud del giacimento)

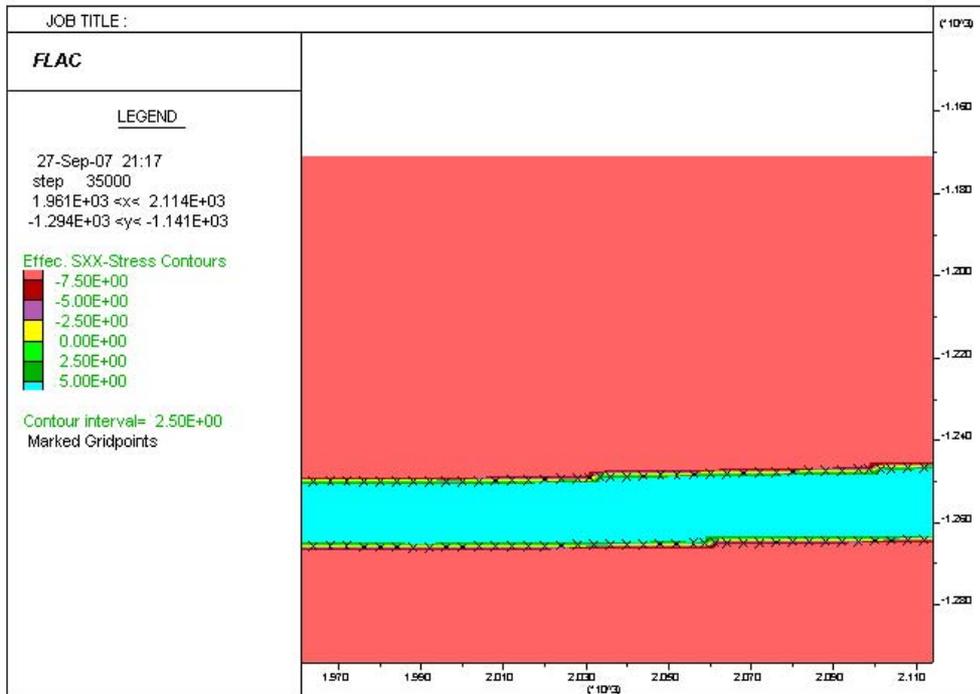


Fig. 46 - Dettaglio delle tensioni orizzontali efficaci nella fase D – Sezione C-C' (zona nord del giacimento)

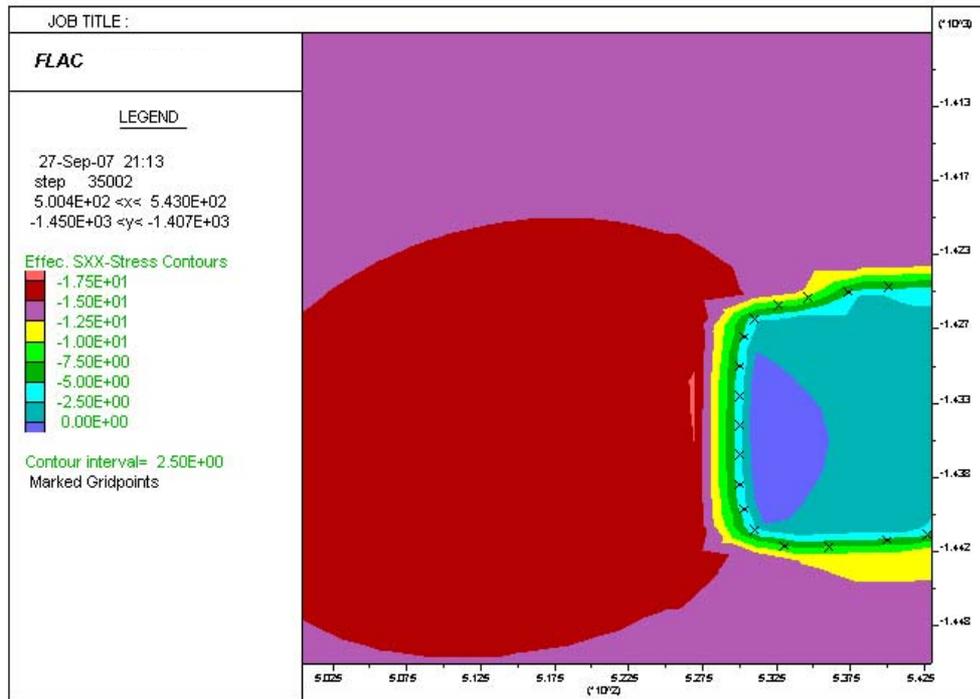


Fig. 47 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase D – Sezione A-A' (zona ovest del giacimento)

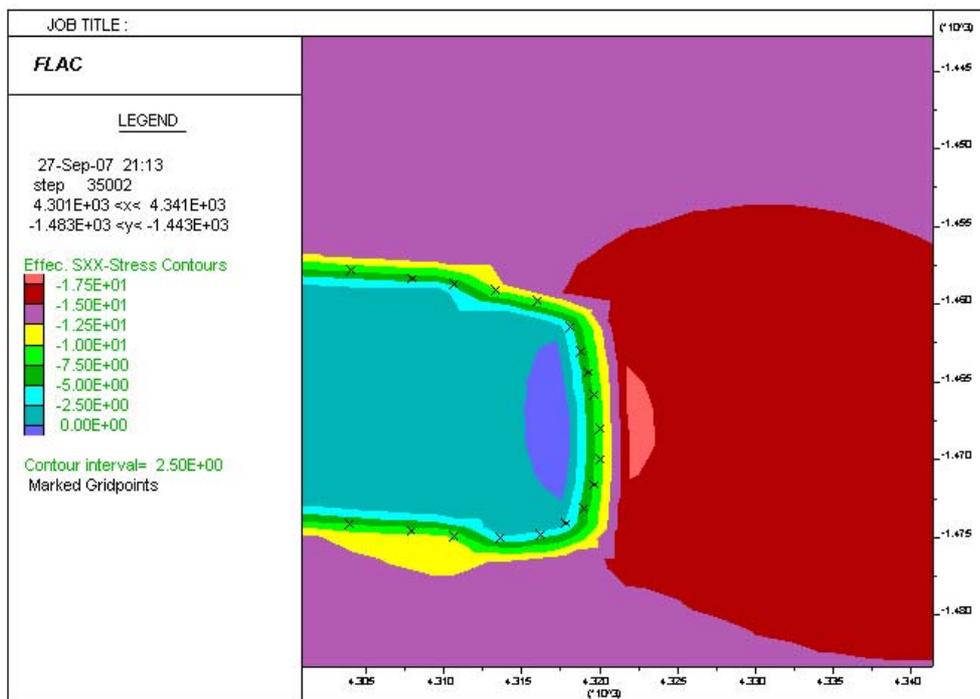


Fig. 48 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase D – Sezione A-A' (zona est del giacimento)

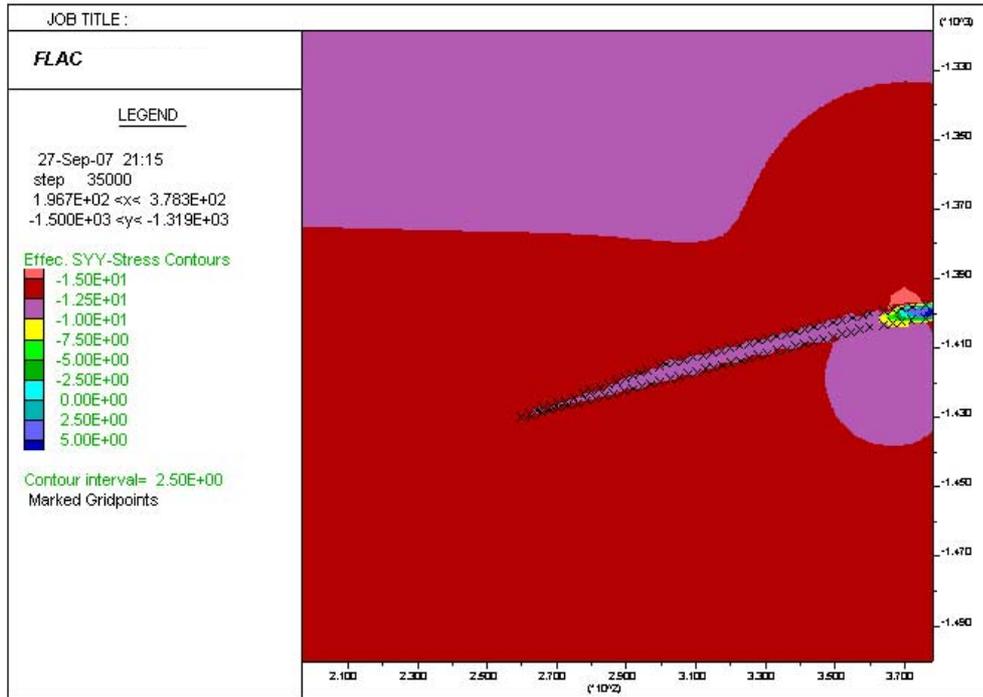


Fig. 49 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase D – Sezione B-B' (zona sud del giacimento)

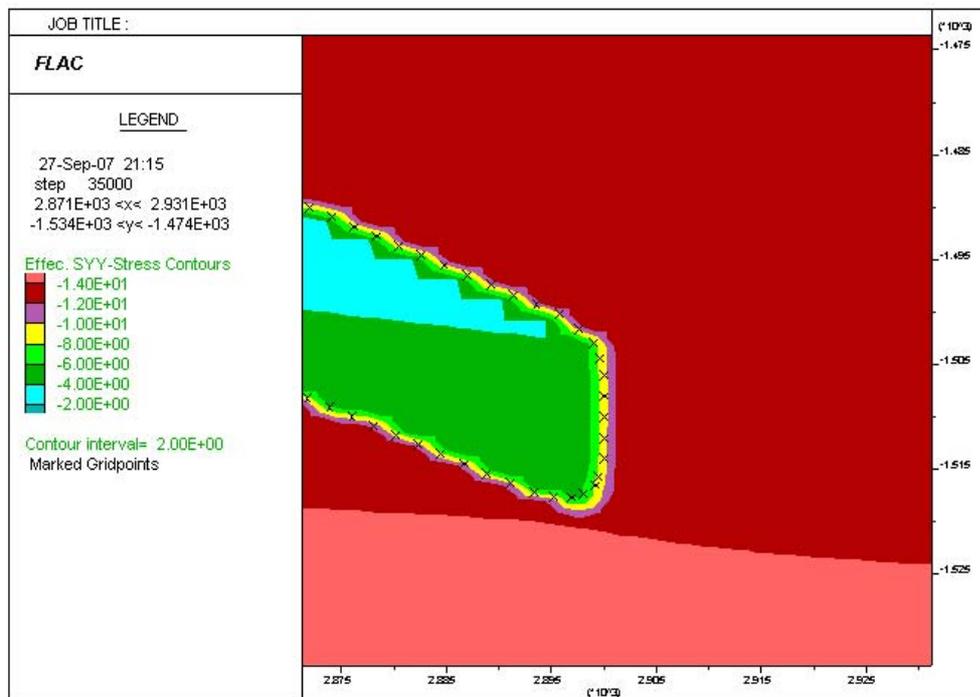


Fig. 50 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase D – Sezione B-B' (zona nord del giacimento)

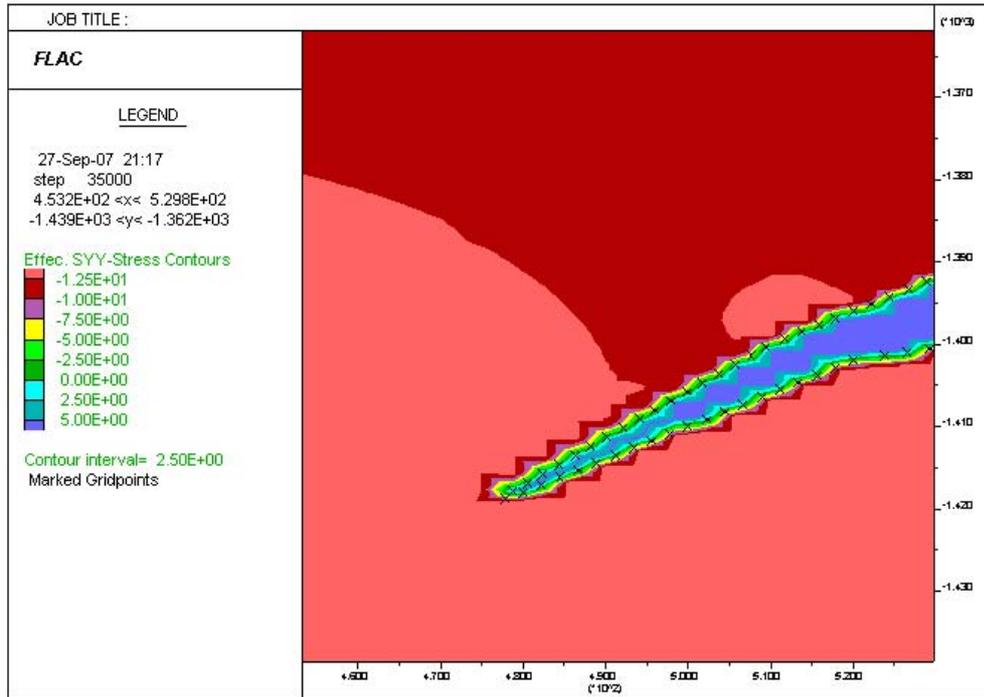


Fig. 51 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase D – Sezione C-C' (zona sud del giacimento)

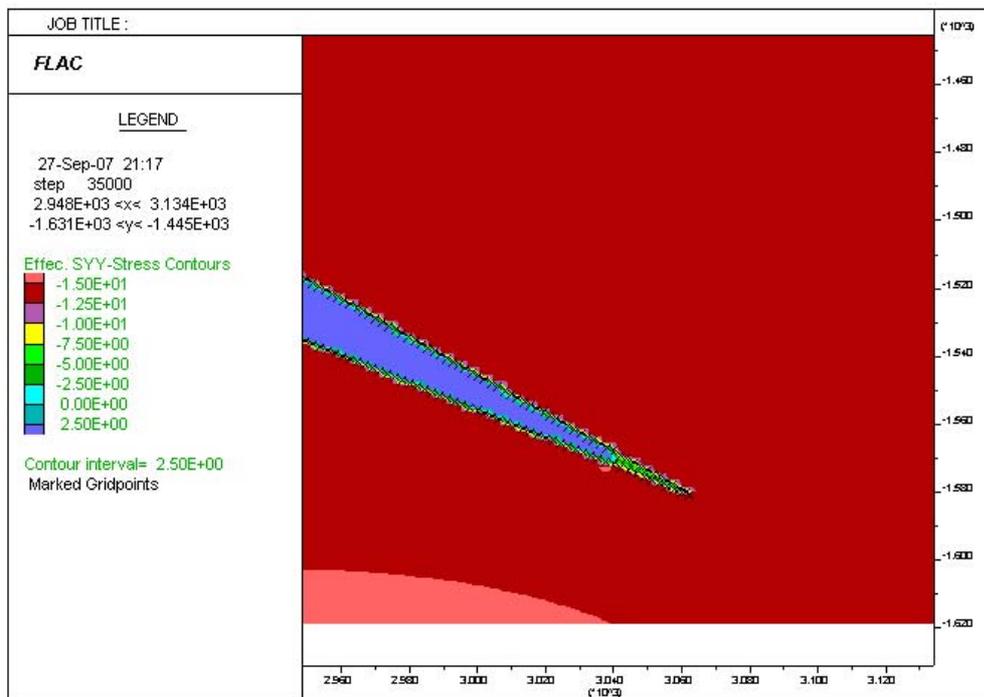


Fig. 52 - Dettaglio delle tensioni verticali efficaci fase D – Sezione C-C' (zona nord del giacimento)

5 CONCLUSIONI

Il presente lavoro è consistito nel verificare la possibilità di operare in condizioni di sicurezza il campo di Sinarca, livello 'R6', qualora convertito ad attività di stoccaggio sotterraneo del gas naturale anche a pressioni massime operative superiori alla pressione di scoperta del giacimento.

Dal punto di vista della tenuta idraulica, sulla base dei risultati delle prove di laboratorio disponibili e nell'ipotesi di considerare cautelativamente la copertura come costituita dalle sole argille che separano il livello 'R6' dal livello sovrastante 'R5', si è valutato che la massima sovrappressione operativa raggiungibile è pari al 126% della pressione iniziale. Va tuttavia tenuto conto del fatto che l'analisi dei log di pozzo evidenzia come la formazione intercettata acquisisca un carattere prevalentemente argilloso oltre i 1000 m di profondità. I livelli 'R' appaiono quindi come singoli corpi sabbiosi collocati all'interno di una sequenza di tipo argilloso dello spessore complessivo di oltre 200 metri.

Nell'ambito dello studio è stata anche accertata l'idoneità della roccia di copertura, in relazione alle caratteristiche geomeccaniche che le competono, a contenere il gas stoccato ad una pressione operativa massima rispettivamente pari ad un incremento del 10%, del 30% e del 50% rispetto al valore della pressione iniziale della formazione. Lo scopo prefissato era stabilire i margini di sicurezza nei confronti della rottura a trazione e taglio la *cap-rock* e per la roccia serbatoio. Il margine di sicurezza esistente in ciascun punto dell'ammasso roccioso può essere espresso in termini di fattore di sicurezza, con il quale si intende il minimo valore del rapporto tra la tensione di taglio limite a rottura e la tensione di taglio agente su una superficie passante per il punto considerato. Fattori di sicurezza prossimi all'unità segnalano una possibile evoluzione verso la rottura del materiale e verso un comportamento tenso-deformativo in campo plastico. In particolare sono state analizzate con un metodo numerico alle differenze finite tre sezioni verticali del giacimento di Sinarca, giudicate come le più rappresentative sia per la morfologia del giacimento sia in quanto lo spessore della roccia di copertura raggiunge in corrispondenza di esse i valori minimi. Lo studio è stato basato su un'analisi di tipo disaccoppiato. I parametri geomeccanici utilizzati nel calcolo sono stati ricavati, quando possibile, da prove di laboratorio; i parametri geomeccanici non disponibili sono stati stimati per analogia con situazioni simili. Nella tabella 8 sono riportati i risultati riassuntivi dello studio numerico in termini di fattori di sicurezza della *cap-rock* al variare della pressione del gas in giacimento. Si può rilevare come il fattore di sicurezza minimo raggiunto per una pressione massima operativa superiore del 50% rispetto a quella iniziale sia di 5.6. Tale valore è da considerarsi superiore ai valori minimi che si possono ritenere ammissibili.

Le tensioni efficaci nella *cap-rock* sono sempre di compressione.



Tab. 8: Fattori di sicurezza nella *cap-rock* al variare della pressione massima di stoccaggio

	PRESSIONE MASSIMA OPERATIVA DI STOCCAGGIO			
	Fase A $p = p_i$	Fase B $p = 1.1 \cdot p_i$	Fase C $p = 1.3 \cdot p_i$	Fase D $p = 1,5 \cdot p_i$
<i>SEZIONE A-A'</i>	7.5	7.1	6.3	5.6
<i>SEZIONE B-B'</i>	9.5	8.3	6.7	5.8
<i>SEZIONE C-C'</i>	11.8	11.4	10.6	9.4

Per quanto riguarda le deformazioni, si rilevano deformazioni orizzontali medie nella *cap-rock* di 1.85 mm/100 m (distensione) nella fase B, 5.35 mm/100 m (distensione) nella fase C e di 7.85 mm/100 m (distensione) nella fase D (le deformazioni sono misurate con riferimento alla fase iniziale A). Tali valori sono da ritenersi accettabili, perché di entità trascurabile e non in grado di causare fessurazioni nella roccia. Relativamente più elevate sono le deformazioni verticali medie di distensione nella roccia serbatoio. Tali valori, comunque attesi, non destano preoccupazioni perché non interessano rocce che svolgono funzioni statiche sul confinamento del gas e perché non sono grandi in termini assoluti (32 mm/100 m nella fase B, 96 mm/100 m nella fase C e 157 mm/100 m nella fase D).

In definitiva, quindi, l'analisi tenso-deformativa della roccia serbatoio e, soprattutto, della roccia di copertura, non ha evidenziato situazioni di criticità per nessuno dei valori di sovrappressione esaminati.



6 BIBLIOGRAFIA

Gas Research Institute: Geomechanical Analysis of Pressure Limits For Gas Storage Reservoirs, Arcadia, California (1998).

Cundall A., Explicit Finite Difference Methods in Geomechanics, Proceedings of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, Virginia, Vol. 1, pp.132-150, 1976.

Itasca Consulting Group, FLAC User Manual - ver. 4, Minneapolis, Minnesota, 1999.