



CAMPO DI
COLLE SANTO

**Integrazioni al quadro
geomeccanico
(punti 21b e 21c)**

Novembre 2017



SOMMARIO

1	INTRODUZIONE.....	2
2	STIMA DELLE VARIAZIONI DEL CARICO LITOSTATICO (..OMISSIS..) [PUNTO 21B]	4
3	VALUTAZIONE DEL GRADO DI COMPATTAZIONE (..OMISSIS..) [PUNTO 21C]	22
4	BIBLIOGRAFIA	37

1 INTRODUZIONE

Il campo di Colle Santo è situato nella regione Abruzzo e ricade nel Permesso di Ricerca "Monte Pallano" (Fig. 1.1). L'estensione dell'area del Permesso di Ricerca include i comuni di Bomba e Pennadomo. Il giacimento è stato scoperto dalla società Agip attraverso la perforazione del pozzo Bomba 1 nel 1966. Negli anni successivi sono stati perforati altri 3 pozzi (Bomba 2, Bomba 3 e Bomba 7) che hanno confermato la mineralizzazione a gas del giacimento. Il campo non è mai stato messo in produzione e tutti i pozzi sono stati chiusi e abbandonati minerariamente. Nella seconda parte del 2007 la società Forest CMI S.p.A. ha ripreso il progetto perforando e testando due pozzi direzionati di *appraisal*, Monte Pallano 1dir (MP 1dir) e Monte Pallano 2dir (MP 2dir). CMI Energia SpA, subentrata nel 2015 alla società Forest CMI SpA, ha in programma di mettere in produzione il giacimento di Colle Santo con un nuovo progetto di sviluppo.

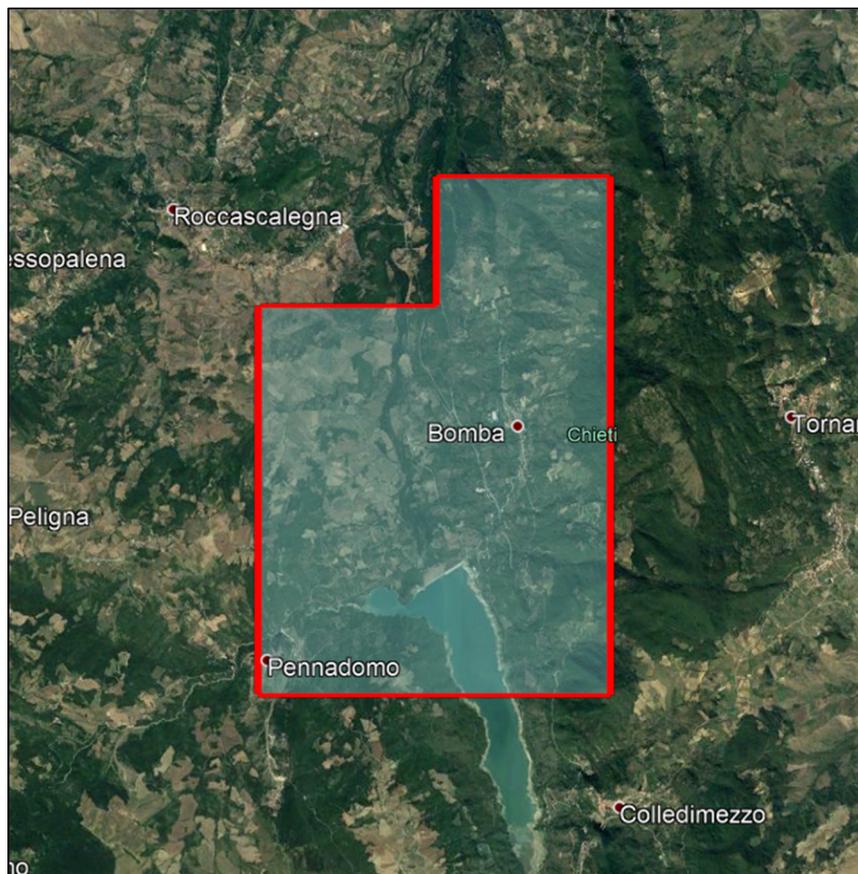


Fig. 1.1 – Ubicazione del Permesso di Ricerca "Monte Pallano" (linea rossa) comprendente il giacimento di Colle Santo.

Il giacimento è costituito da una trappola strutturale di tipo anticlinale fagliata verso ovest. Il culmine della struttura è localizzato ad una profondità di circa 1000 m TVDss. La zona circostante al campo è caratterizzata da discontinuità tettoniche che coinvolgono sia le formazioni sottostanti che quelle sovrastanti il giacimento, fino alla successione alloctona in sovrascorrimento sui depositi pliocenici. Dal punto di vista litostratigrafico il *reservoir*

rappresenta un intervallo carbonatico di età Cretaceo superiore-Miocene medio-superiore riferibile alla successione indifferenziata di avampaese Apulo (Cretaceo superiore) e alla Formazione Bolognano (Serravalliano-Tortoniano). La roccia di copertura del giacimento (*cap rock*) è costituita da un intervallo di calcare argilloso-marnoso appartenente alla Formazione Bolognano (DREAM, 2016).

Il presente studio contiene approfondimenti relativi all'analisi di alcuni aspetti dello studio della subsidenza effettuato da DREAM s.r.l. ("CAMPO DI COLLE SANTO - Studio della subsidenza indotta dalla futura produzione del campo", Maggio 2016) e, in particolare, tratta i seguenti punti:

- Stima delle variazioni del carico litostatico in base ai dati previsti di emungimento, quindi in positivo o in negativo, associate alle attività minerarie.
- Valutazione del grado di compattazione della serie stratigrafica e della subsidenza attesa in funzione dell'emungimento del gas.

2 STIMA DELLE VARIAZIONI DEL CARICO LITOSTATICO (..omissis..) [PUNTO 21b]

Il carico litostatico è rappresentato dal peso dello scheletro solido e dei fluidi saturanti ed equivale alla tensione verticale totale. Nello studio di subsidenza, in assenza di informazioni circa l'orientamento e l'entità degli sforzi principali, è stato assunto uno stato tensionale gravitazionale; ne consegue che lo stato tensionale verticale totale che grava sopra il campo di Colle Santo dipende solo dal peso delle formazioni sature sovrastanti, fino al piano campagna, secondo la relazione:

$$\sigma_v^{tot} = \int_0^z \gamma(z) dz$$

dove:

σ_v^{tot} : tensione verticale totale;

z: profondità;

$\gamma(z)$: peso specifico della formazione.

A seguito della messa in produzione di un giacimento può verificarsi una variazione nella distribuzione del carico litostatico, detta effetto arco, in virtù della quale il giacimento viene in parte sgravato dal peso dei sedimenti sovrastati. Il manifestarsi dell'effetto arco nonché la sua intensità sono essenzialmente governati da due fattori: il fattore forma del giacimento e il contrasto tra le proprietà di deformabilità del giacimento e quelle delle formazioni limitrofe.

Quando lo spessore del giacimento è rilevante rispetto alla sua estensione areale (idealmente una sfera), l'effetto arco ridistribuisce il carico litostatico in modo tale da schermare parzialmente il giacimento. Viceversa, se il rapporto tra lo spessore verticale e l'estensione areale tende a zero (idealmente un disco), il carico litostatico che grava sul campo non subisce variazioni a seguito della produzione. Inoltre, l'effetto arco è tanto più pronunciato quanto più la rigidità delle formazioni depressurizzate (depletate) è minore rispetto alla rigidità delle formazioni adiacenti.

Nel caso in analisi, il volume depletato a seguito della messa in produzione del campo di Colle Santo è di circa 4 km x 4 km, con uno spessore variabile tra 75 m e 140 m; inoltre, in considerazione della specifica litologia in esame, la rigidità del giacimento (calcari fratturati) e la rigidità della sua roccia di copertura (calcere marnoso-argilloso) sono confrontabili e ben maggiori rispetto a quelle che caratterizzano le formazioni sommitali (evaporiti, argille, Alloctono, depositi marini e alluvioni) fino al piano campagna (Fig. 2.1). Per una trattazione dettagliata delle caratteristiche meccaniche delle formazioni si rimanda alla relazione: "CAMPO DI COLLE SANTO - Studio della subsidenza indotta dalla futura produzione del campo", Maggio 2016 (DREAM, 2016).

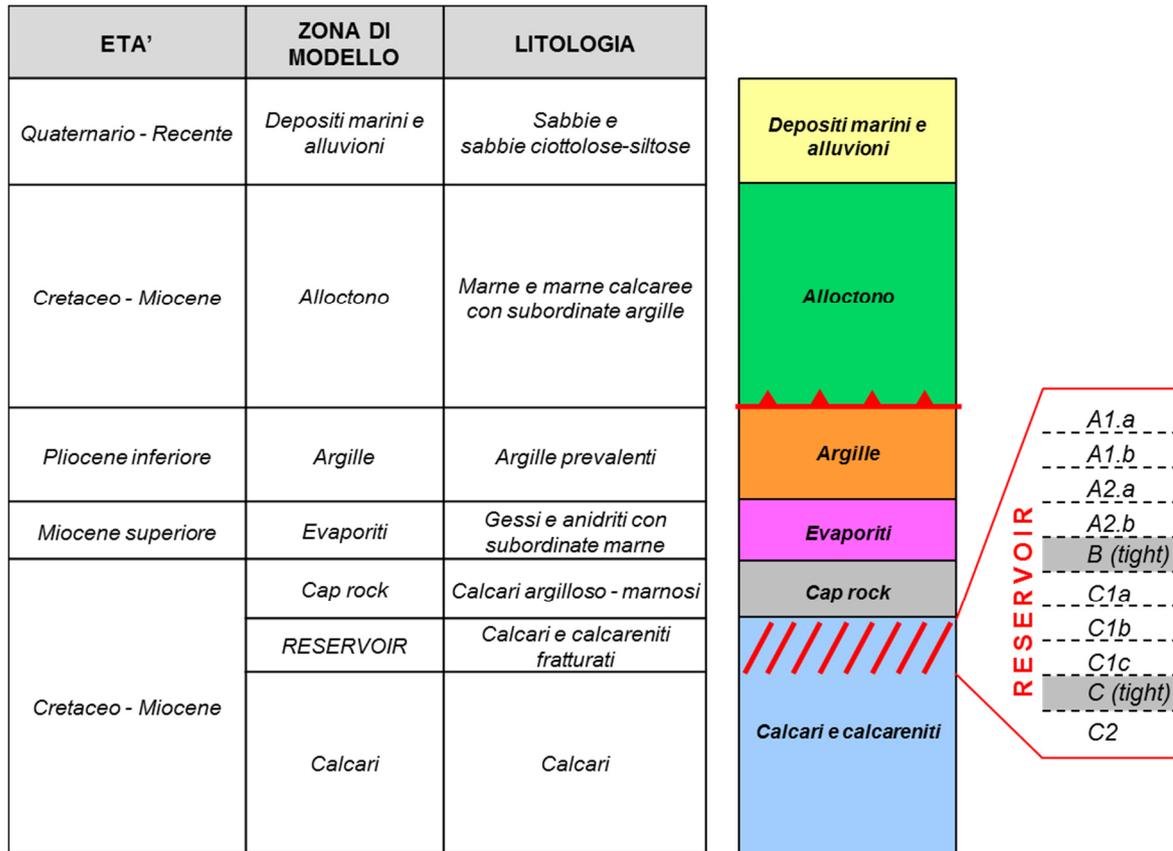


Fig. 2.1 – Zonazione stratigrafica del modello 3D del campo di Colle Santo.

Quindi, sia per fattore di forma sia per contrasto tra le caratteristiche meccaniche, il campo di Colle Santo e le formazioni limitrofe non risultano interessate dall'effetto arco. Queste considerazioni teoriche trovano conferma nei risultati delle simulazioni meccaniche.

La variazione dello stato tensionale verticale totale a seguito della messa in produzione del giacimento risulta sempre trascurabile in tutti gli scenari analizzati ad eccezione delle celle attraversate dalle faglie Fault 1 e Fault 2 che delimitano idraulicamente il giacimento e l'acquifero limitrofo (Fig. 2.2 e Fig. 2.3). A titolo di esempio, le Fig. 2.4 e Fig. 2.5 riportano le variazioni delle tensioni verticali totali tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali per il caso di simulazione E (acquifero forte, moduli dinamici) in un livello di giacimento: queste variazioni sono imputabili al fatto che le faglie costituiscono una barriera idraulica e quindi sono soggette ad una differenza di pressione tra le formazioni che si depletano a seguito della produzione di gas e le formazioni indisturbate in cui la pressione resta sempre uguale a quella idrostatica iniziale.

A questo fenomeno fisico si sommano gli effetti numerici dovuti essenzialmente alle forme marcatamente irregolari di alcune celle di faglia.

Sono state individuate 3 sezioni verticali particolarmente significative perché interessate da variazioni di tensione verticale totale apprezzabili (Fig. 2.6). Le figure da Fig. 2.7 a Fig. 2.24 riportano, per ognuna di queste sezioni, la variazione delle tensioni verticali totali per i casi di simulazione più rappresentativi, ovvero:

- Caso E (modulo dinamico, acquifero forte): caso realistico;
- Caso A (modulo statico, acquifero medio): caso prudenziale;
- Caso C (modulo conservativo, acquifero medio): caso conservativo.

e per gli intervalli temporali più significativi, ovvero:

- variazione tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali;
- variazione tra la fine della simulazione dinamica (dopo ri-persurizzazione del sistema ad opera dell'acquifero) e la fine della produzione primaria.

Come si evince dalle immagini riportate, le variazioni delle tensioni verticali totali sono apprezzabili solo nelle zone adiacenti le faglie principali in giacimento, e marginalmente, nella roccia di copertura. Queste considerazioni valgono per tutti gli scenari analizzati.

Le figure da Fig. 2.25 a Fig. 2.30 riportano, per le celle attraversate dalle faglie principali, la distribuzione delle variazioni dello stato tensionale verticale totale per i due intervalli temporali sopra citati e per tutti i sei scenari analizzati nello studio di subsidenza (Tab. 2.1). In tutti i casi simulati, le variazioni tensionali con frequenza maggiore sono comprese nell'intervallo |5| - |25| bar: le tensioni verticali totali nelle celle di faglia diminuiscono durante la produzione e aumentano durante la fase di ri-persurizzazione ad opera dell'acquifero. In particolare, in fase di ri-persurizzazione l'incremento delle tensioni è tanto più marcato quanto maggiore è la forza dell'acquifero ipotizzato. I valori di variazione delle tensioni verticali totali più elevati interessano un numero esiguo di celle e sono plausibilmente dovuti anche ad effetti numerici.

Tab. 2.1 – Scenari di analisi.

Caso	Acquifero medio	Acquifero forte	Moduli statici	Moduli dinamici	Moduli conservativi
A	X		X		
B	X			X	
C	X				X
D		X	X		
E		X		X	
F		X			X

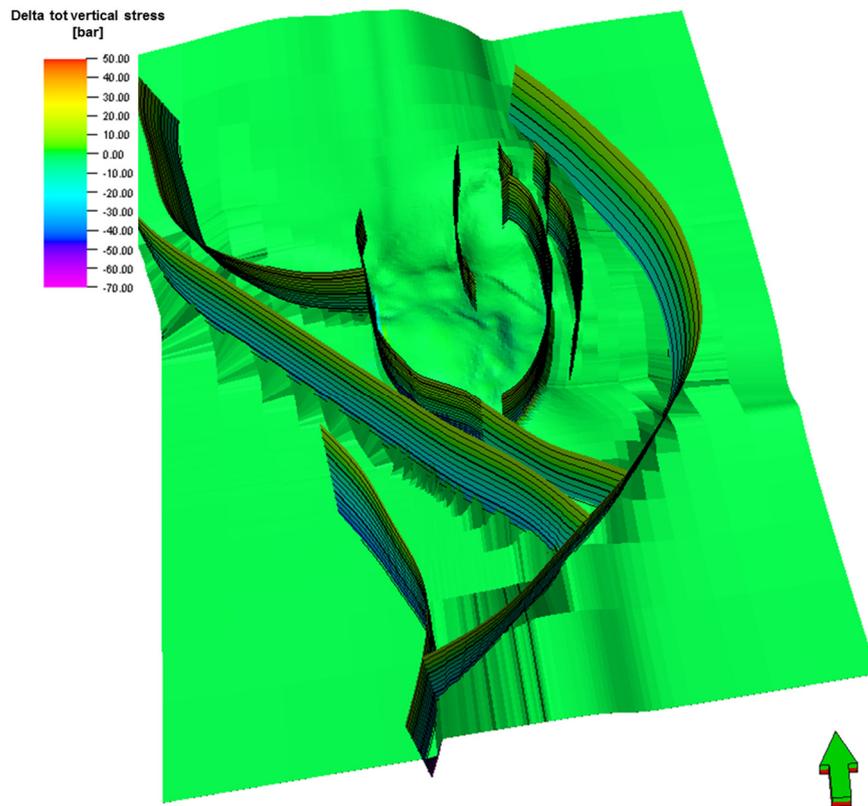


Fig. 2.2 – Faglie definite nel modello di simulazione.

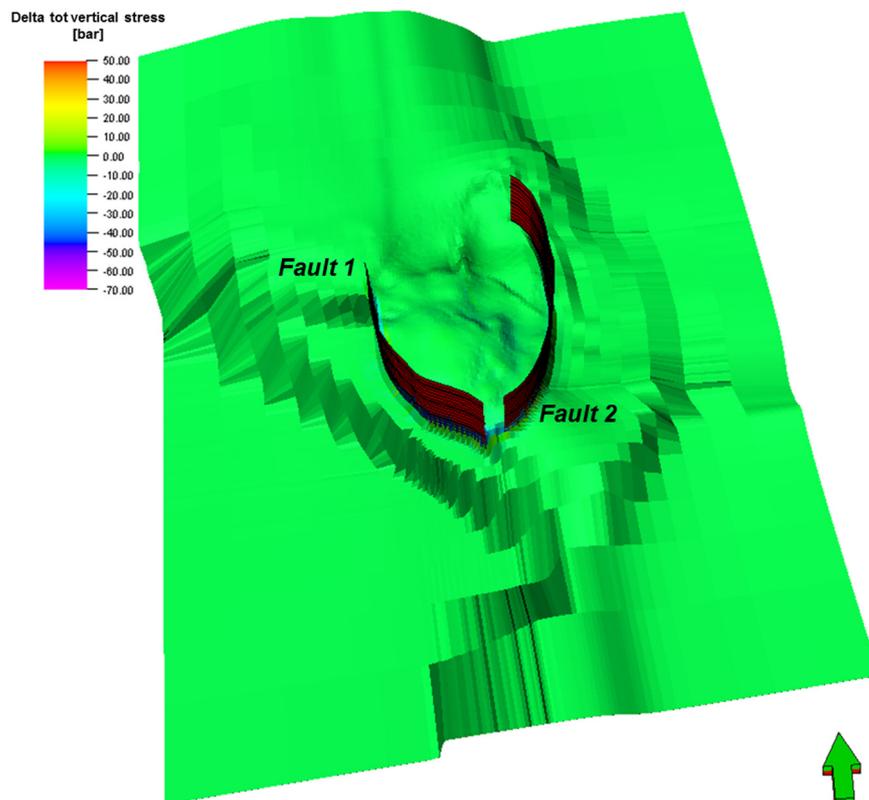


Fig. 2.3 – Faglie principali: Fault1 e Fault2.

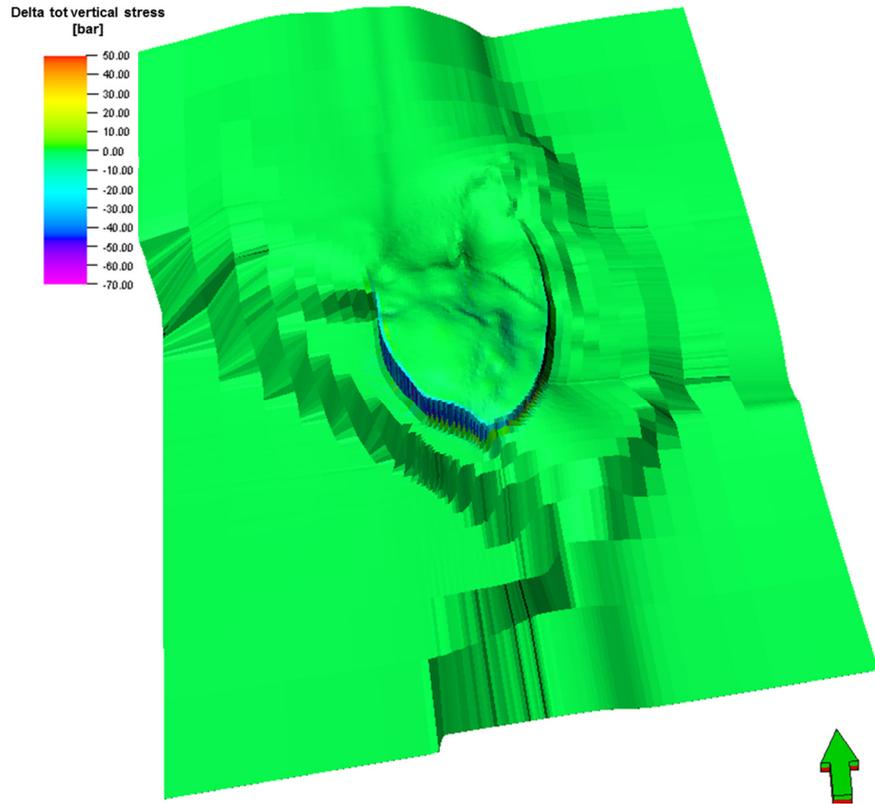


Fig. 2.4 – Caso E: variazione dello stato tensionale verticale totale tra la fine della produzione primaria e le condizioni indisturbate (vista 1).

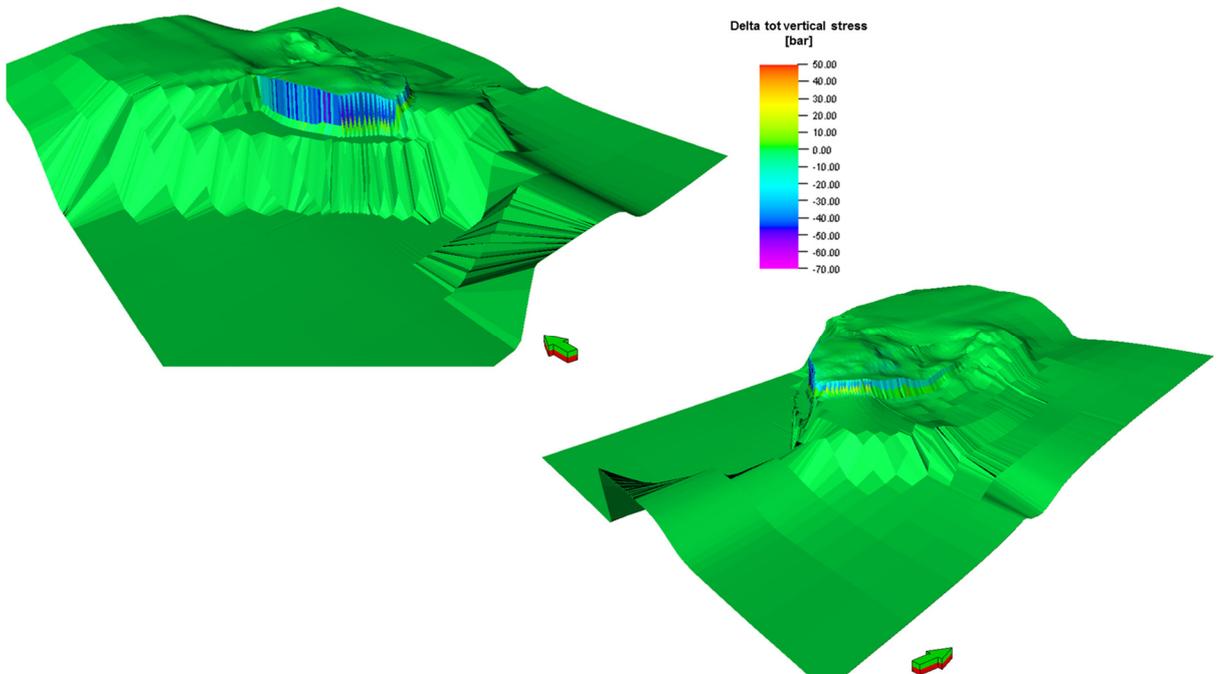


Fig. 2.5 – Caso E: variazione dello stato tensionale verticale totale tra la fine della produzione primaria e le condizioni indisturbate (viste 2 e 3).

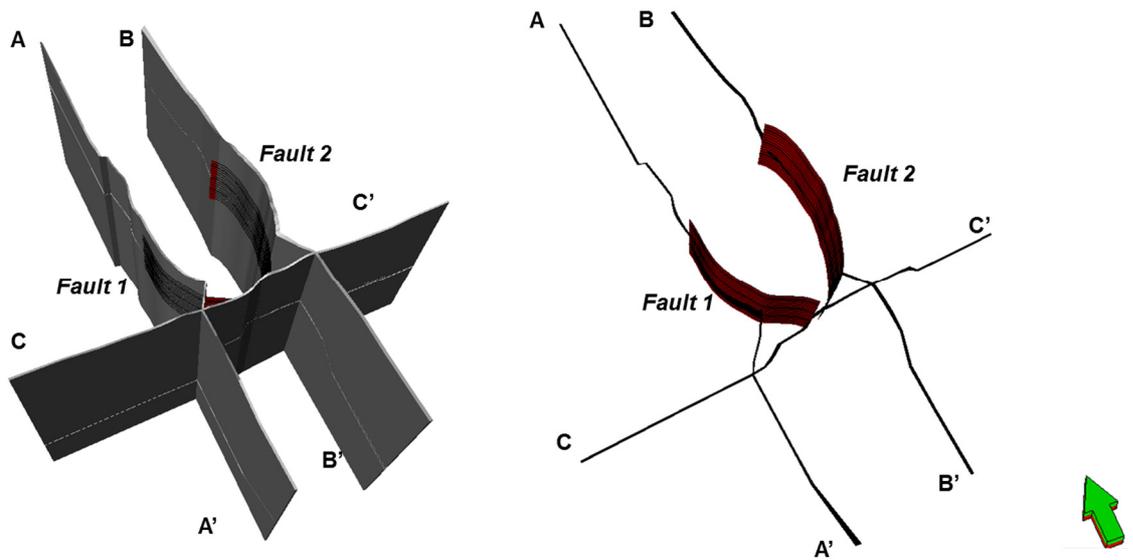


Fig. 2.6 – Sezioni di analisi: A-A', B-B' e C-C'.

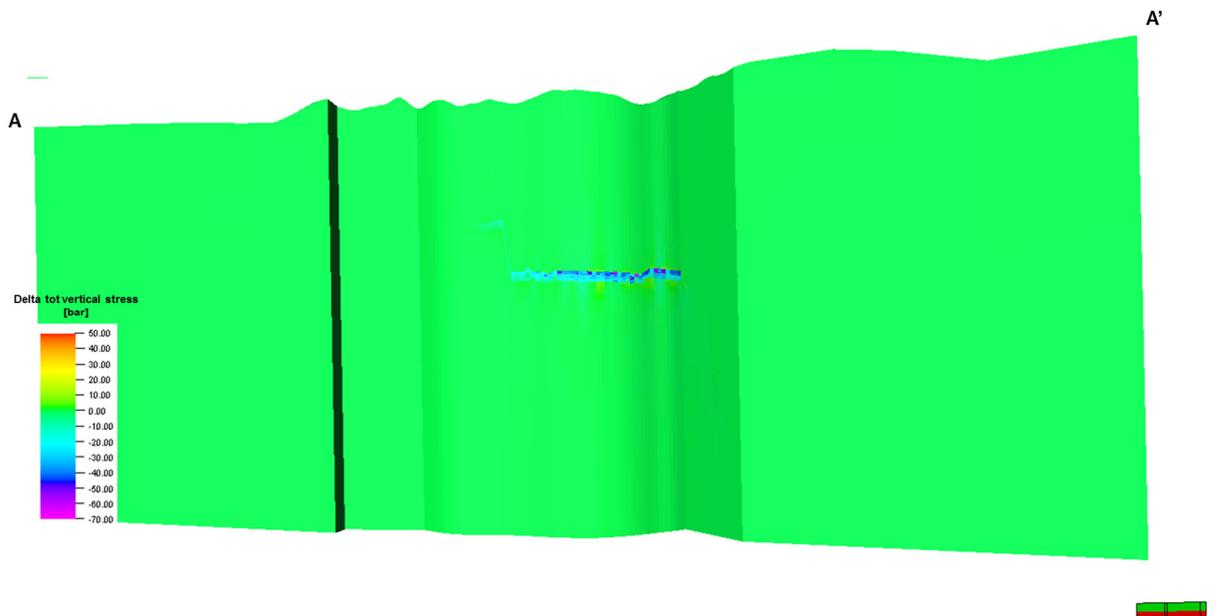


Fig. 2.7 – Caso E – sezione A-A': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali.

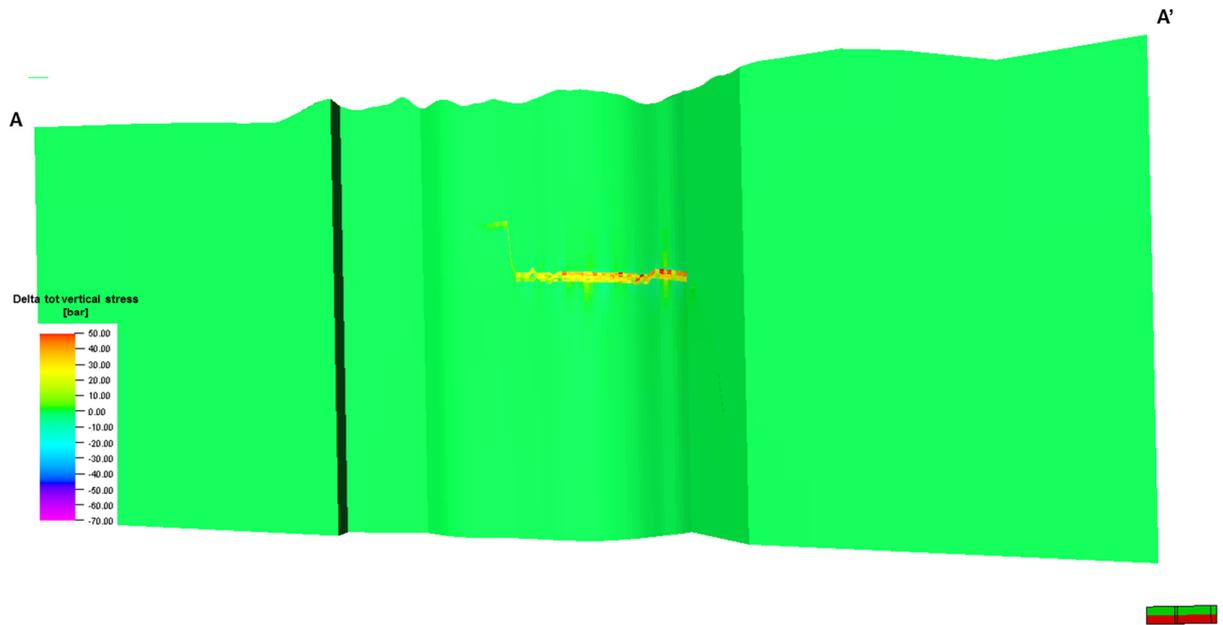


Fig. 2.8 – Caso E – sezione A-A': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della simulazione dinamica e la fine della produzione primaria.

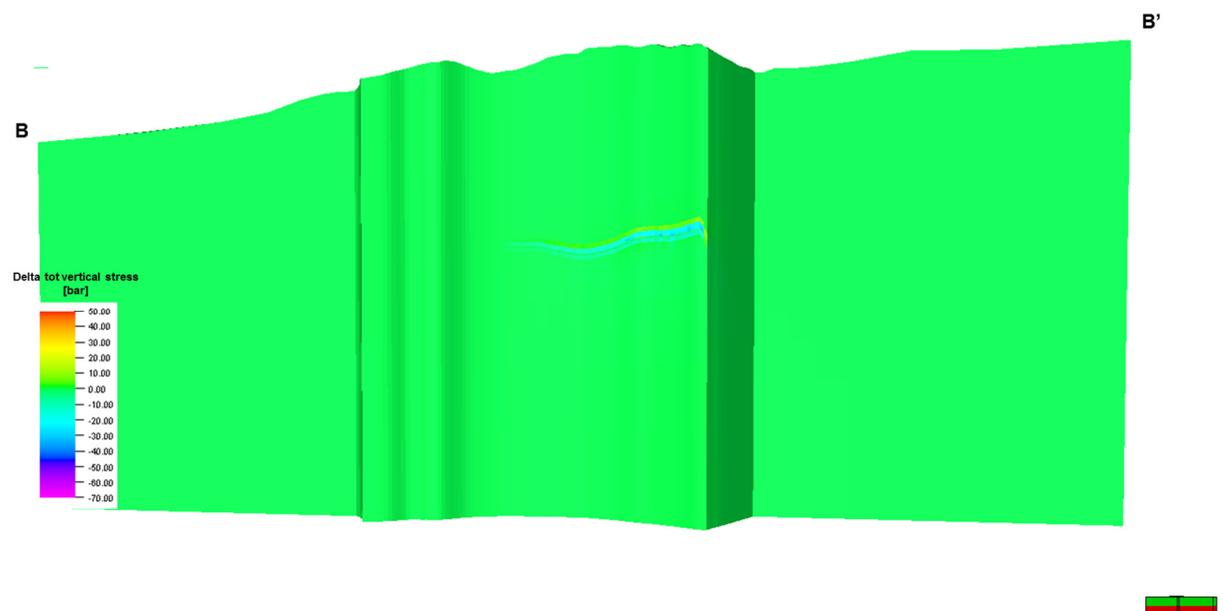


Fig. 2.9 – Caso E – sezione B-B': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali.

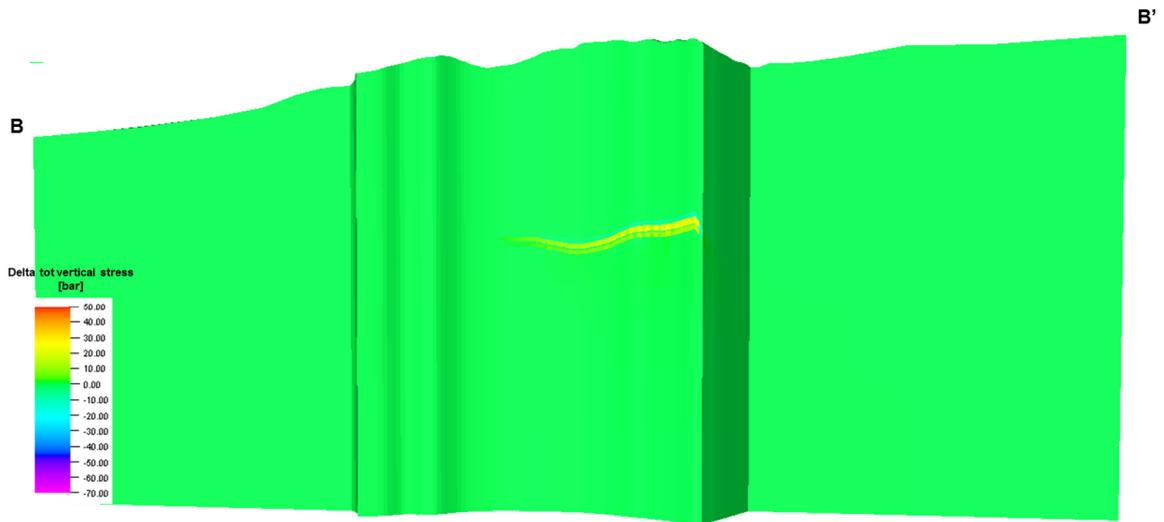


Fig. 2.10 – Caso E – sezione B-B': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della simulazione dinamica e la fine della produzione primaria.

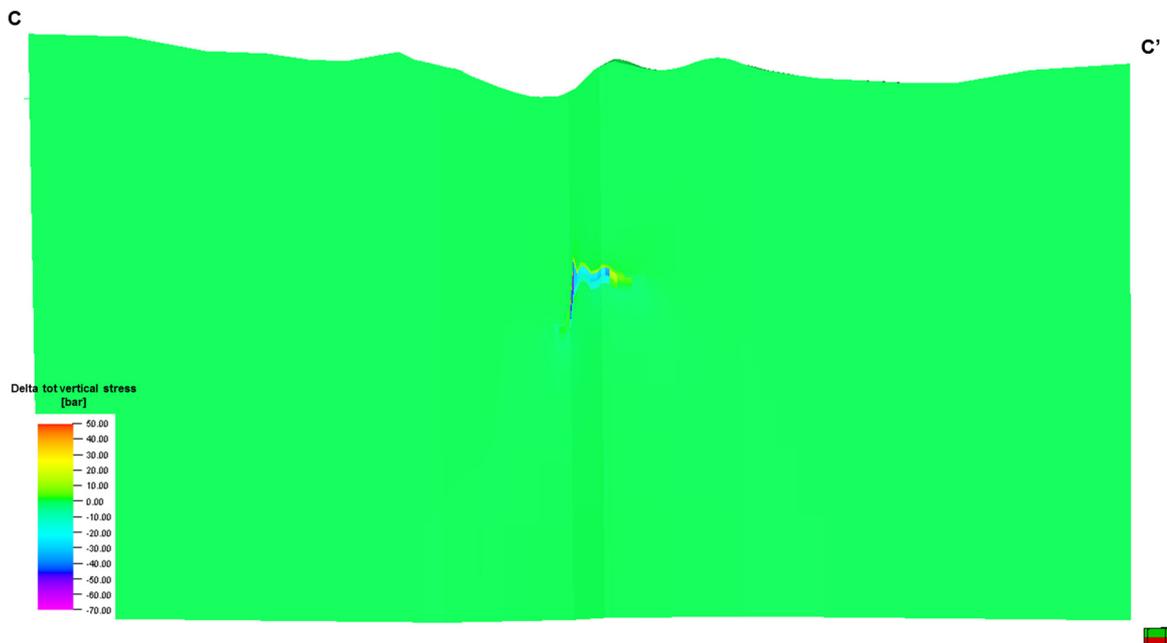


Fig. 2.11 – Caso E – sezione C-C': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali.

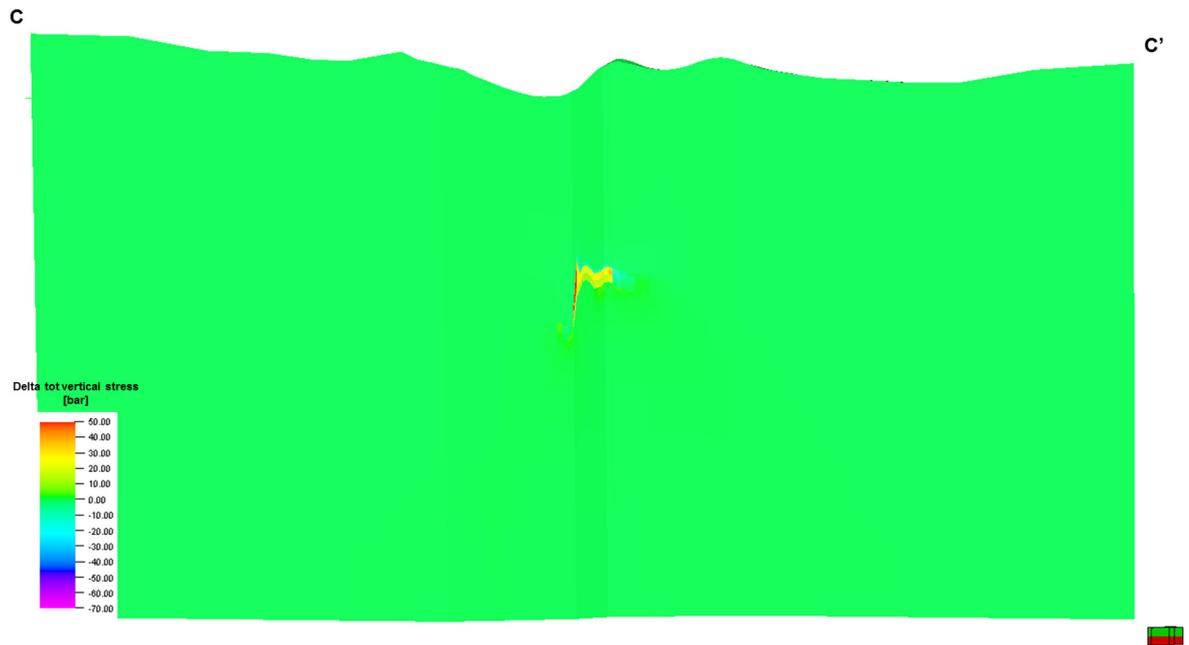


Fig. 2.12 – Caso E– sezione C-C': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della simulazione dinamica e la fine della produzione primaria.



Fig. 2.13 – Caso A – sezione A-A': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali.

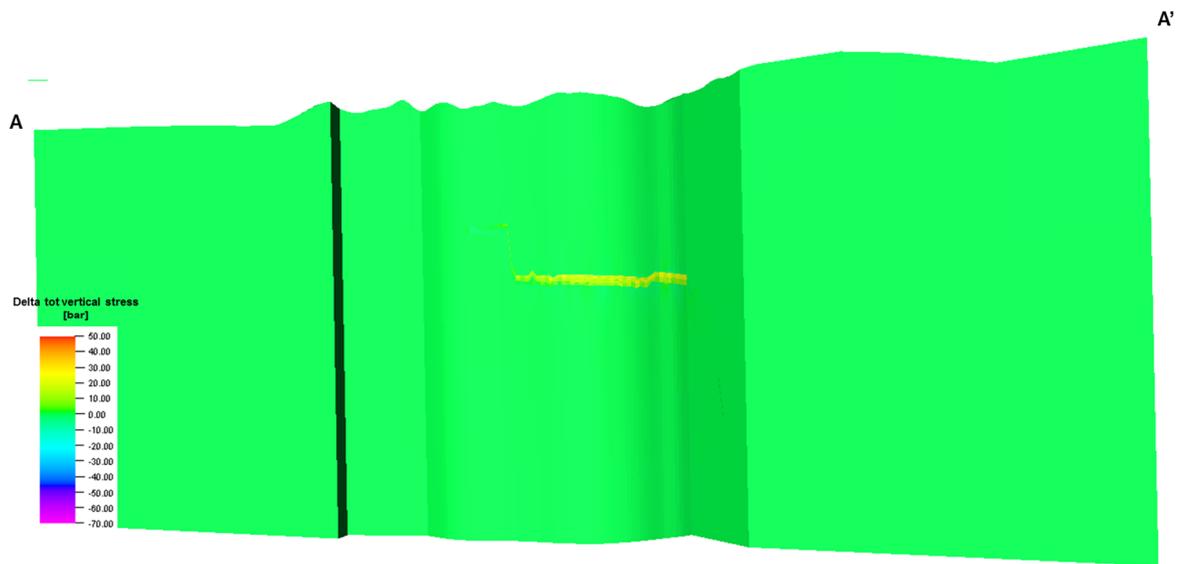


Fig. 2.14 – Caso A – sezione A-A': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della simulazione dinamica e la fine della produzione primaria.

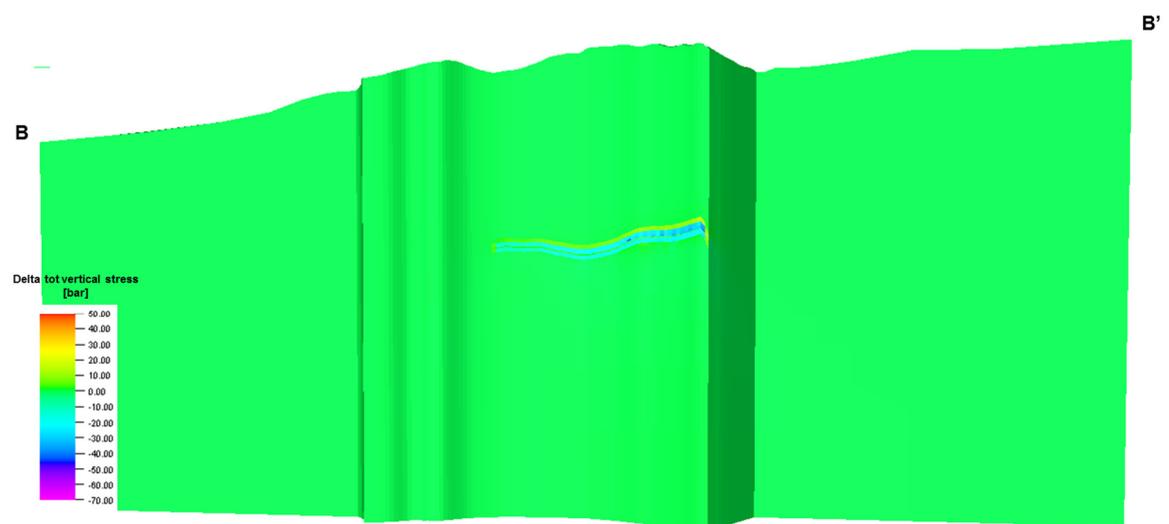


Fig. 2.15 – Caso A – sezione B-B': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali.

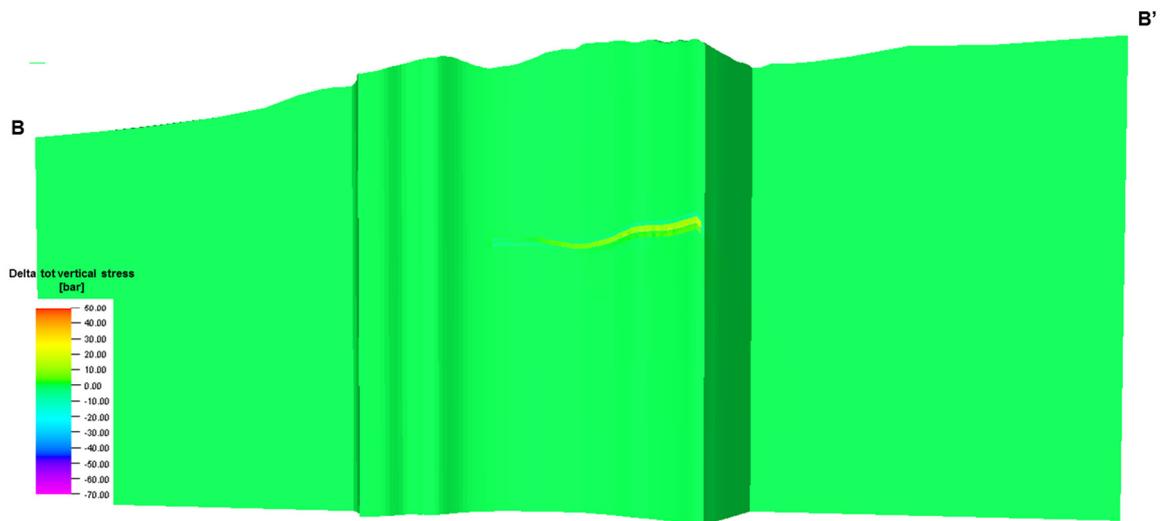


Fig. 2.16 – Caso A – sezione B-B': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della simulazione dinamica e la fine della produzione primaria.

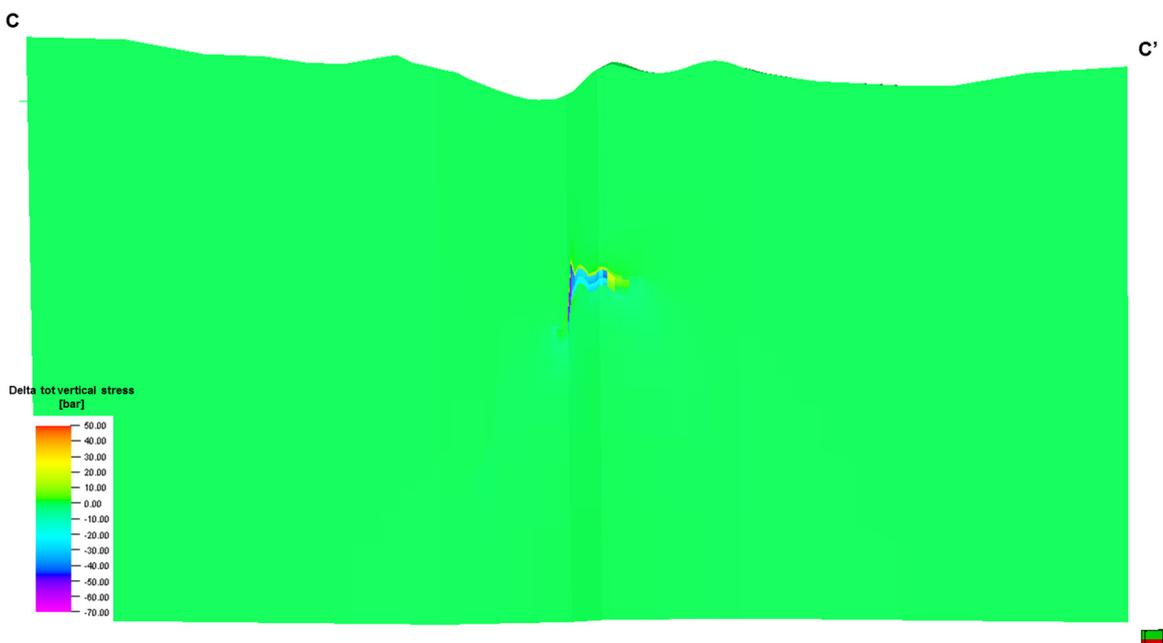


Fig. 2.17 – Caso A – sezione C-C': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali.

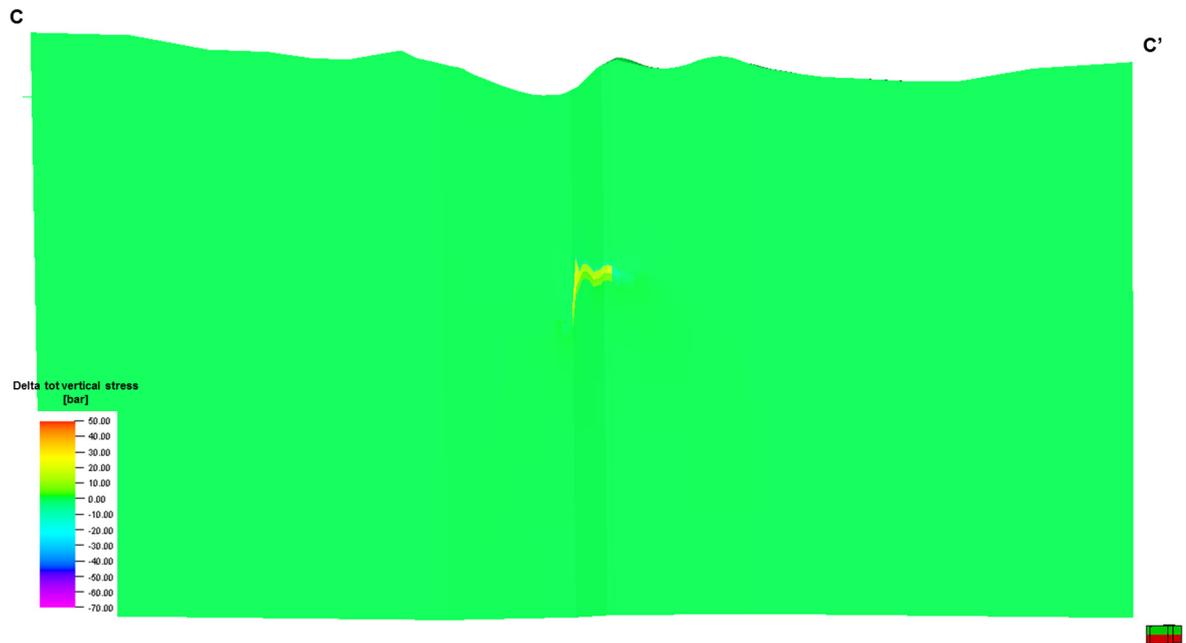


Fig. 2.18 – Caso A – sezione C-C': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della simulazione dinamica e la fine della produzione primaria.

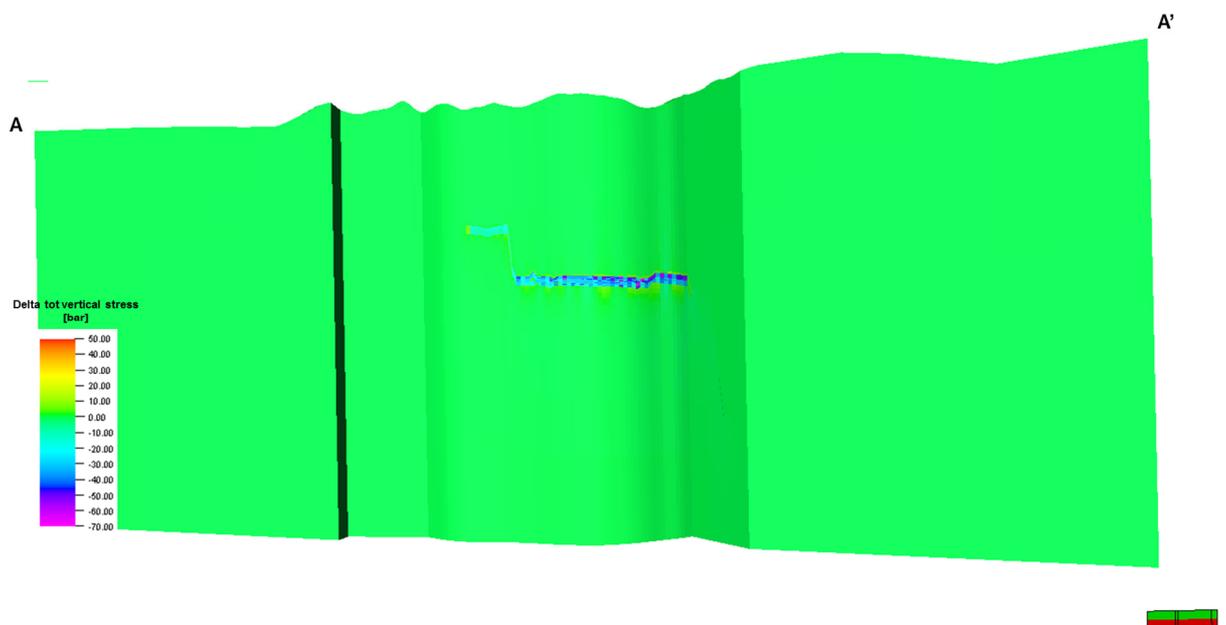


Fig. 2.19 – Caso C – sezione A-A': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali.

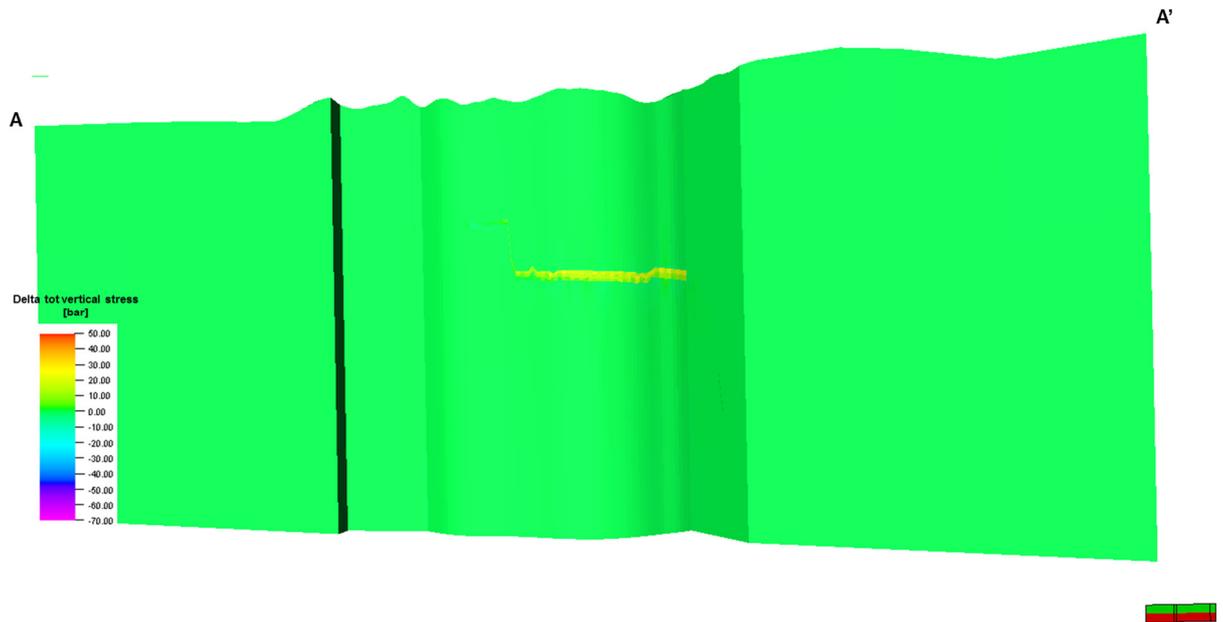


Fig. 2.20 – Caso C – sezione A-A': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della simulazione dinamica e la fine della produzione primaria.

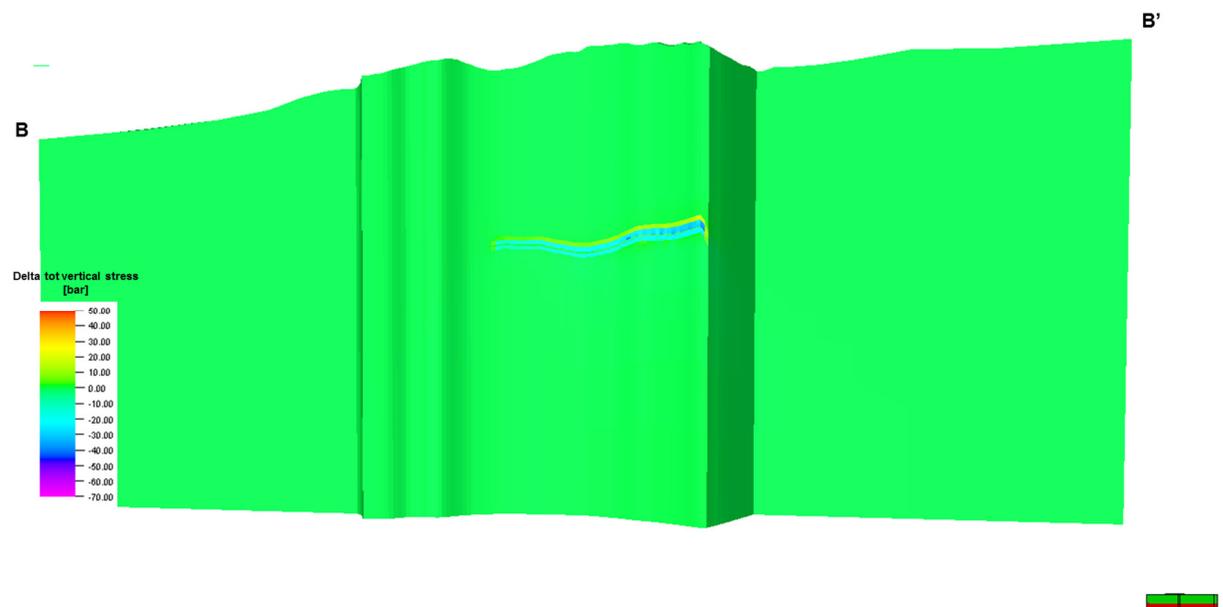


Fig. 2.21 – Caso C – sezione B-B': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali.

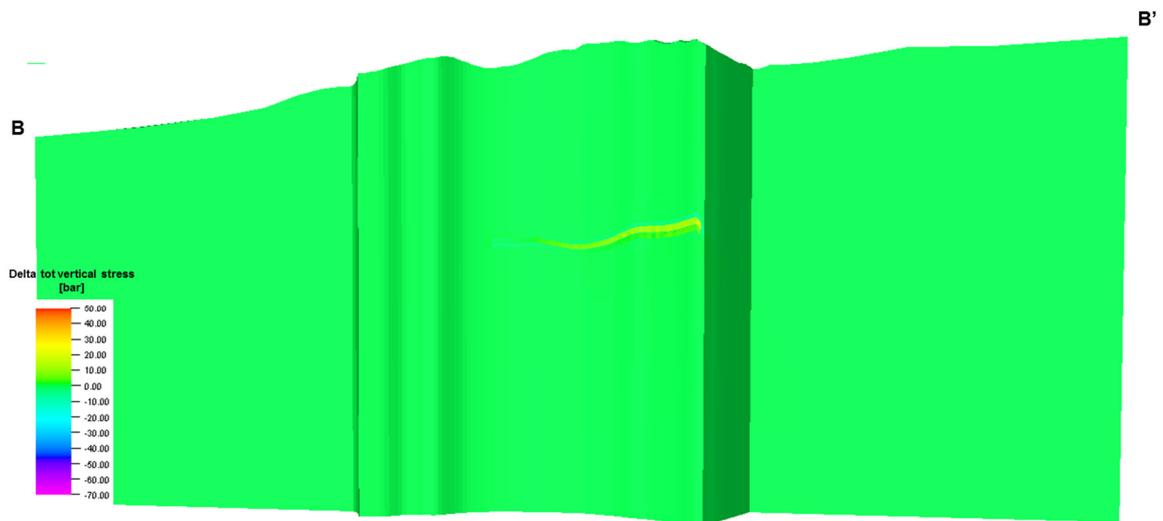


Fig. 2.22 – Caso C – sezione B-B': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della simulazione dinamica e la fine della produzione primaria.

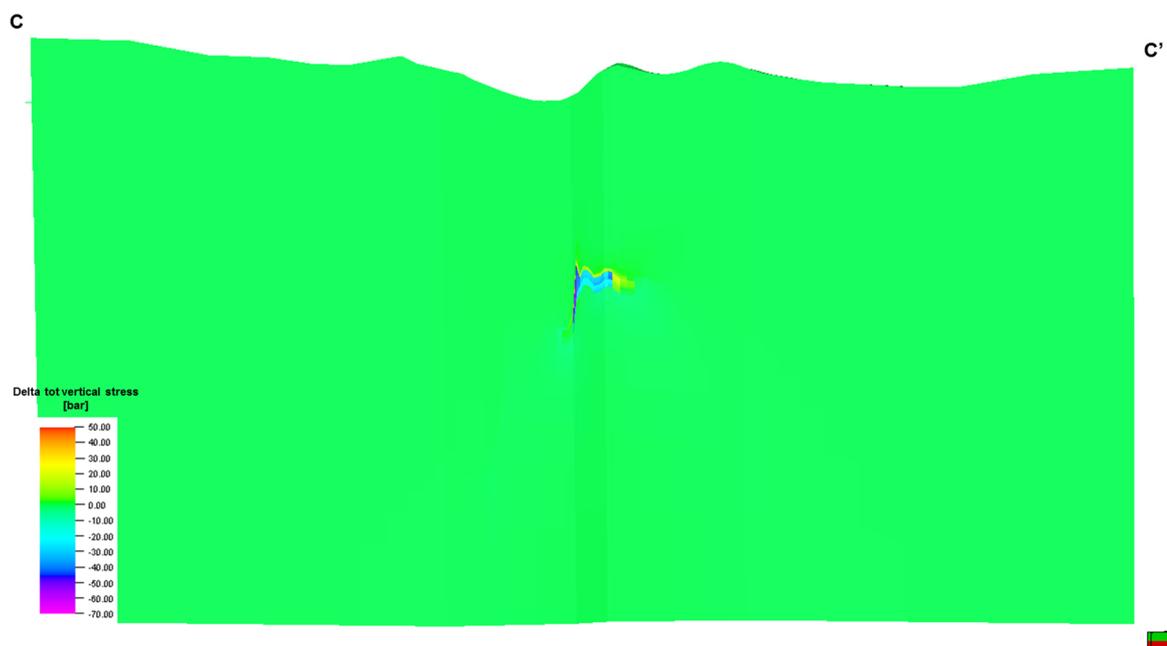


Fig. 2.23 – Caso C – sezione C-C': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali.

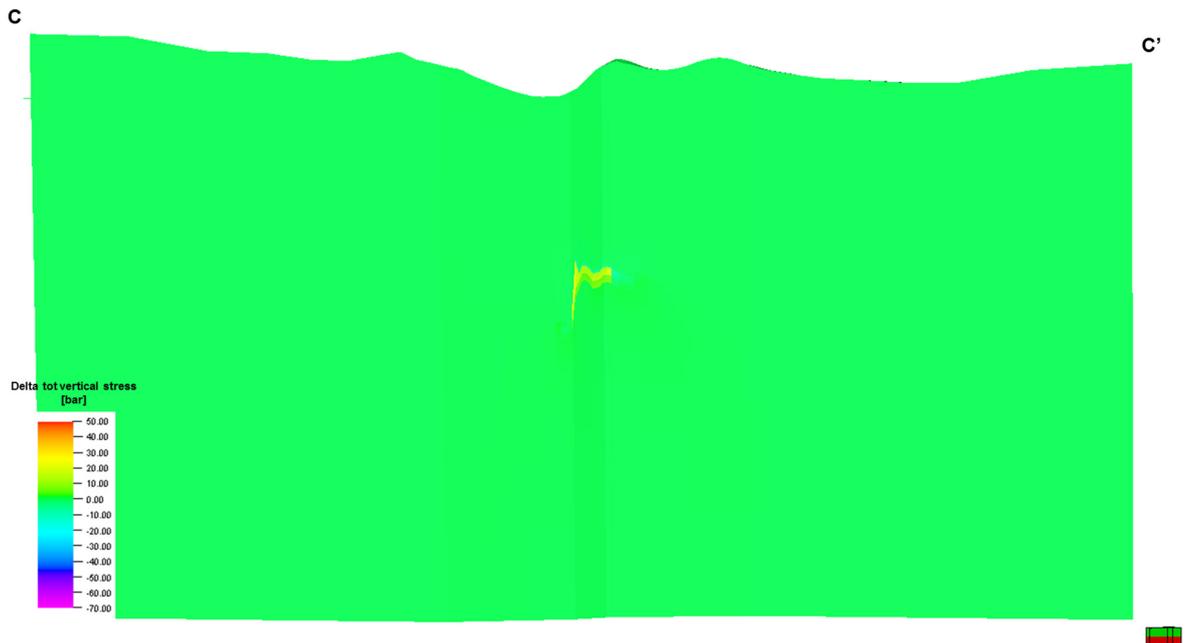


Fig. 2.24 – Caso C – sezione C-C': variazione delle tensioni verticali totali tra la fine della simulazione dinamica e la fine della produzione primaria.

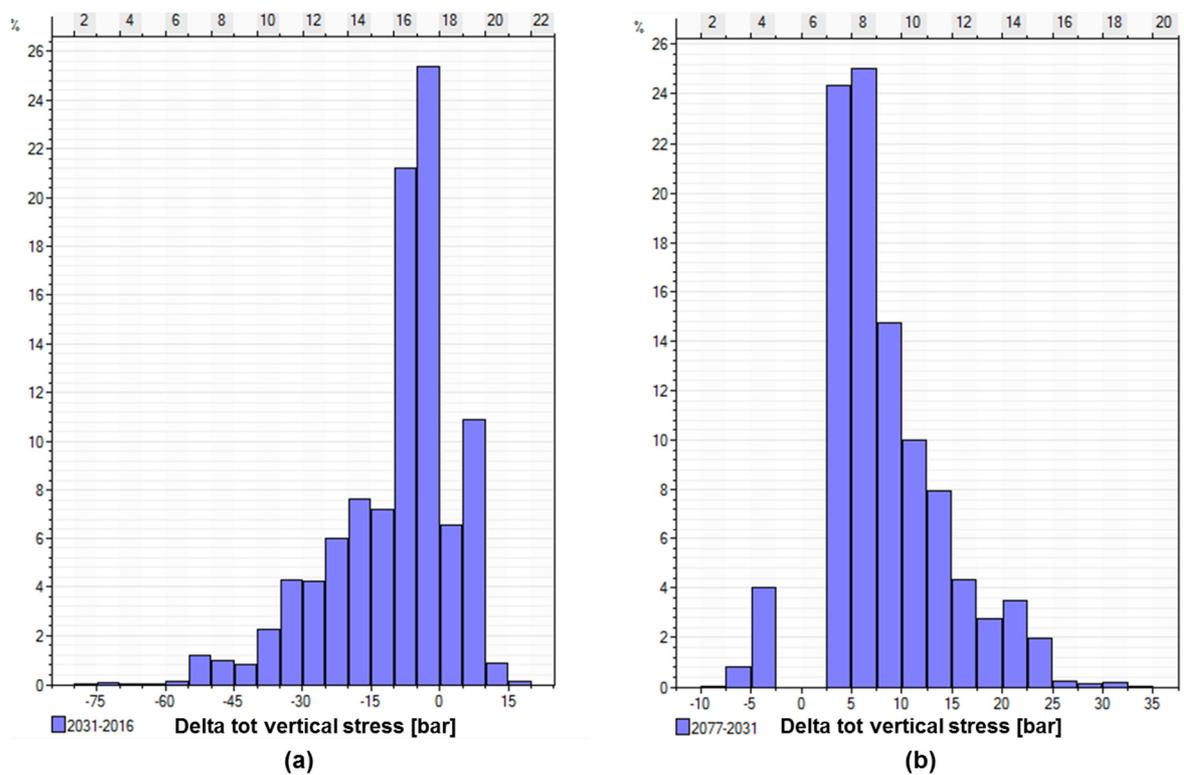


Fig. 2.25 – Caso A: distribuzione delle variazioni delle tensioni totali verticali nelle celle attraversate dalle faglie Fault 1 e Fault 2: (a) differenza tra produzione primaria e condizioni iniziali; (b) differenza tra fine simulazione dinamica e produzione primaria.

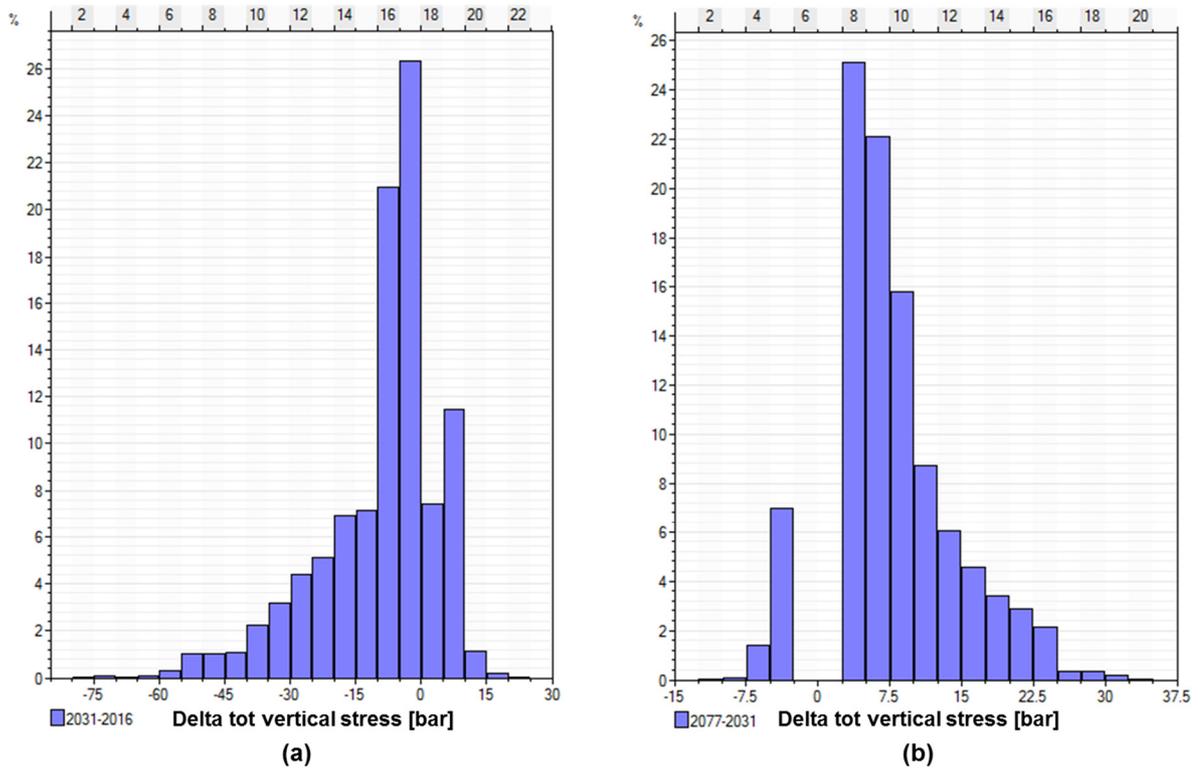


Fig. 2.26 – Caso B: distribuzione delle variazioni delle tensioni totali verticali nelle celle attraversate dalle faglie Fault 1 e Fault 2: (a) differenza tra produzione primaria e condizioni iniziali; (b) differenza tra fine simulazione dinamica e produzione primaria.

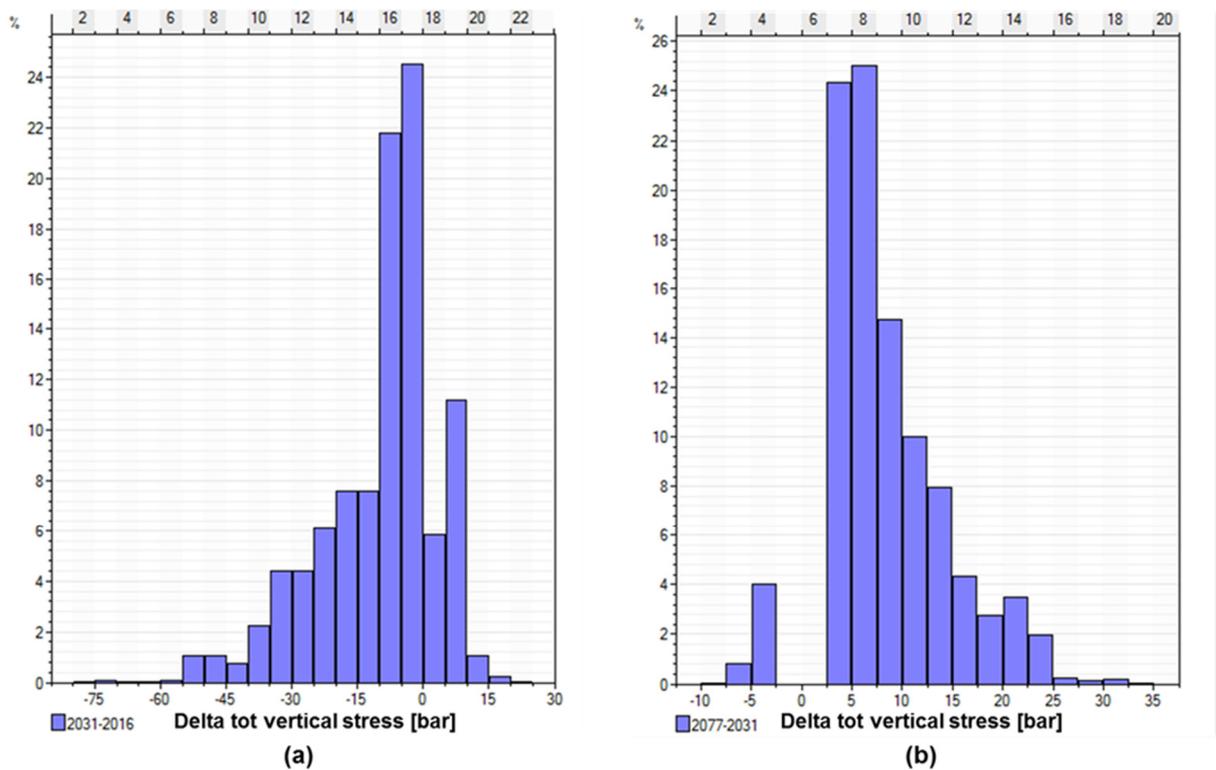


Fig. 2.27 – Caso C: distribuzione delle variazioni delle tensioni totali verticali nelle celle attraversate dalle faglie Fault 1 e Fault 2: (a) differenza tra produzione primaria e condizioni iniziali; (b) differenza tra fine simulazione dinamica e produzione primaria.

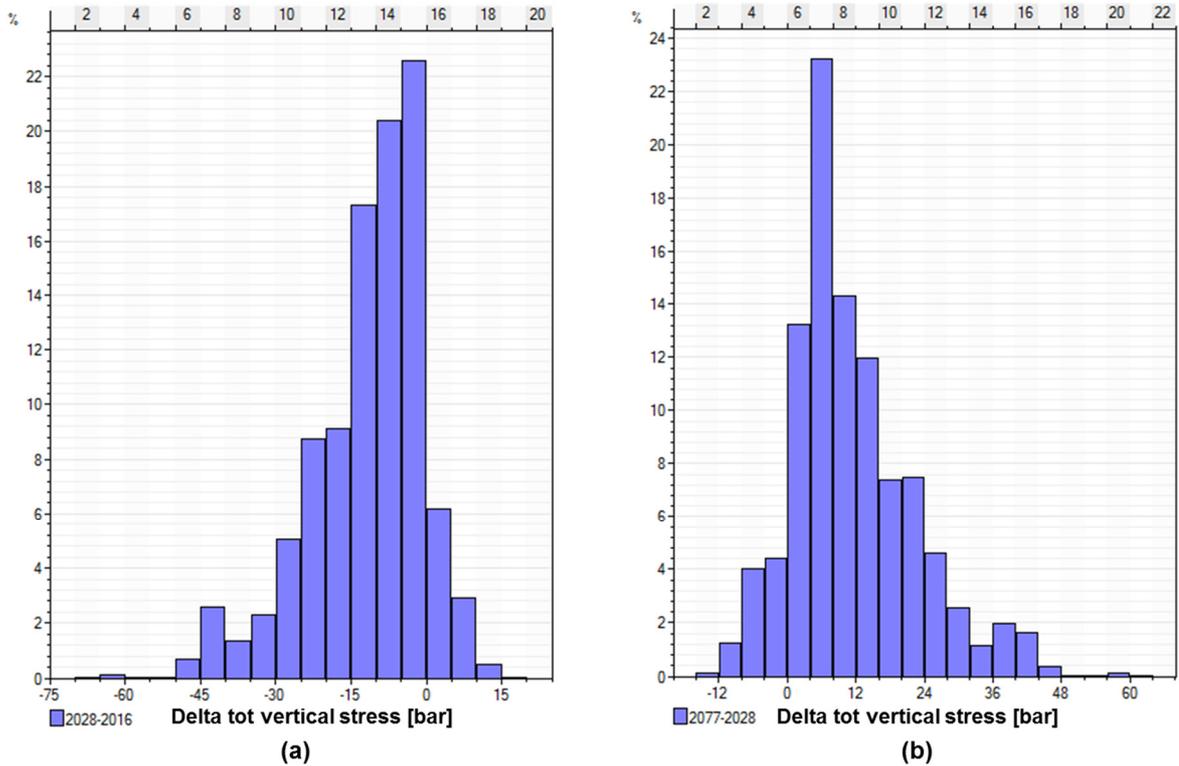


Fig. 2.28 – Caso D: distribuzione delle variazioni delle tensioni totali verticali nelle celle attraversate dalle faglie Fault 1 e Fault 2: (a) differenza tra produzione primaria e condizioni iniziali; (b) differenza tra fine simulazione dinamica e produzione primaria.

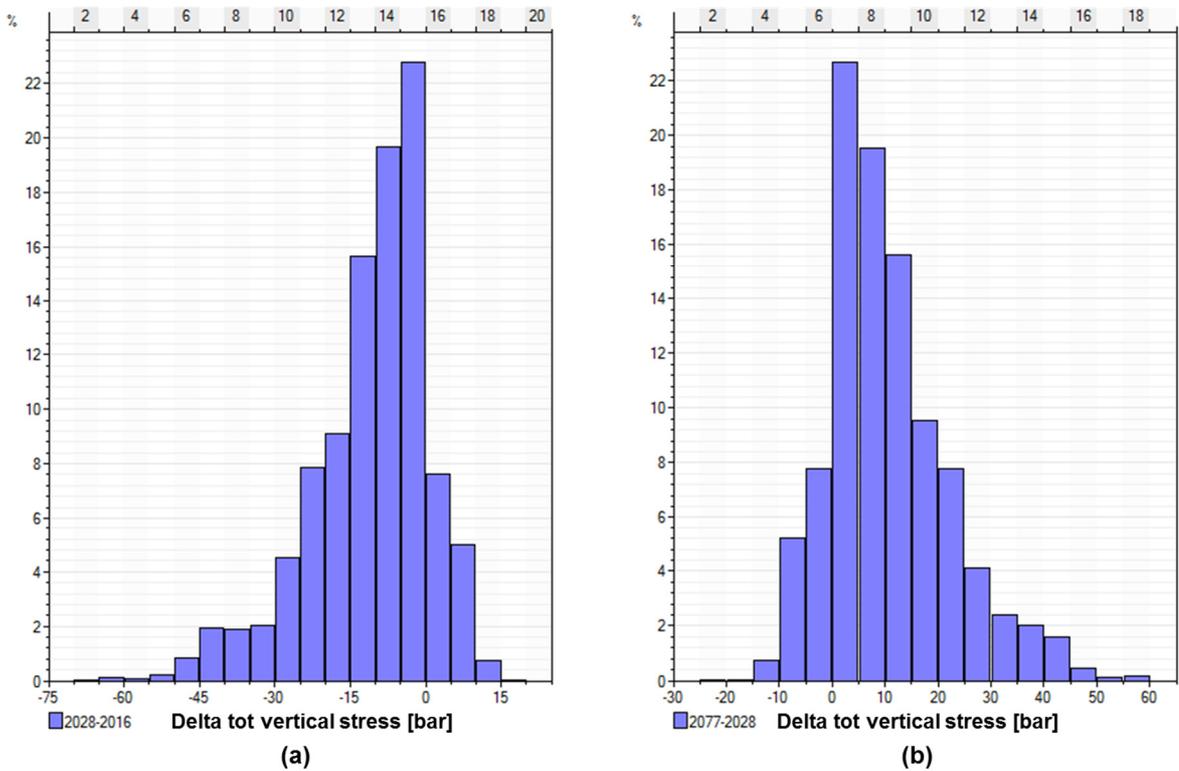


Fig. 2.29 – Caso E: distribuzione delle variazioni delle tensioni totali verticali nelle celle attraversate dalle faglie Fault 1 e Fault 2: (a) differenza tra produzione primaria e condizioni iniziali; (b) differenza tra fine simulazione dinamica e produzione primaria.

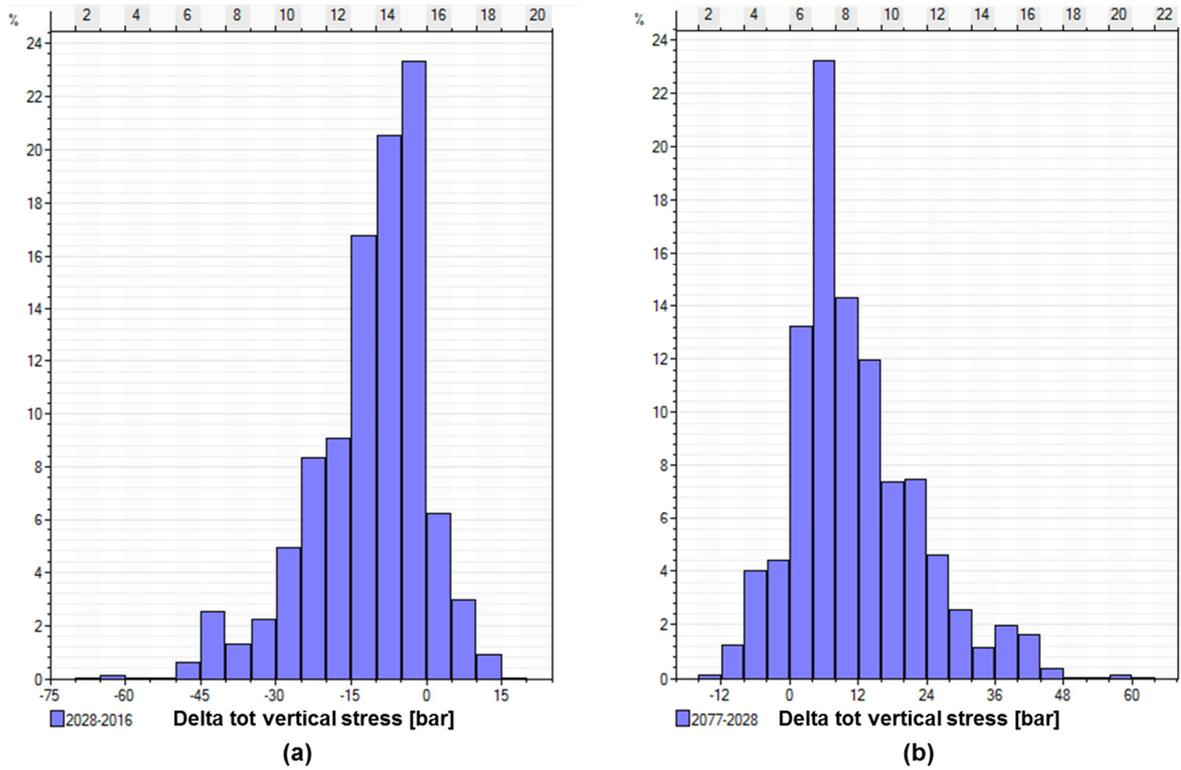


Fig. 2.30 – Caso F: distribuzione delle variazioni delle tensioni totali verticali nelle celle attraversate dalle faglie Fault 1 e Fault 2: (a) differenza tra produzione primaria e condizioni iniziali; (b) differenza tra fine simulazione dinamica e produzione primaria.

3 VALUTAZIONE DEL GRADO DI COMPATTAZIONE (..omissis..) [PUNTO 21C]

In riferimento alla richiesta di provvedere alla: ‘valutazione del grado di compattazione della serie stratigrafica e della subsidenza attesa in funzione dell'emungimento del gas’ si precisa quanto segue:

- per la valutazione della subsidenza attesa si rimanda alla relazione “CAMPO DI COLLE SANTO - Studio della subsidenza indotta dalla futura produzione del campo”, (DREAM s.r.l., Maggio 2016);
- per meglio chiarire il grado di compattazione della serie stratigrafica, nel presente capitolo vengono riportate e commentate mappe e sezioni relative agli istanti temporali più rappresentativi, nonché una tabella riepilogativa con i risultati principali.

A seguito della diminuzione della pressione interstiziale che si verifica in giacimento e nell’acquifero limitrofo durante la fase di produzione, si determina una deformazione volumetrica ε_v positiva, seguendo la convenzione dei segni della meccanica delle rocce, ovvero:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$$

dove:

ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} sono le deformazioni longitudinali relative alle direzioni x, y e z, rispettivamente. Questo fenomeno prende il nome di compattazione. Parte di questa deformazione viene recuperata nella successiva fase di ri-pressurizzazione ad opera dell’acquifero.

Per ognuno dei sei scenari di analisi (casi A, B, C, D, E, F), le figure da Fig. 3.2 a Fig. 3.19 mostrano la distribuzione delle deformazioni volumetriche in uno dei livelli sommitali di giacimento (interessato da valori maggiori di deformazione volumetrica) nonché in una sezione rappresentativa (la cui ubicazione è riportata in Fig. 3.1), sia alla fine della produzione primaria sia alla fine della simulazione dinamica (dopo ri-pressurizzazione del sistema ad opera dell’acquifero).

In tutti i casi analizzati, le deformazioni volumetriche raggiungono entità apprezzabili solo nei volumi interessati dalla variazione di pressione interstiziale. In particolare, le deformazioni massime si concentrano nei livelli sommitali di giacimento, in corrispondenza del culmine strutturale dove sono ubicati i pozzi di produzione.

La Tab. 3.1 riassume i valori massimi delle deformazioni volumetriche. In tutti gli scenari analizzati, le deformazioni volumetriche massime a fine produzione primaria sono dell’ordine di 10^{-4} e, come era intuitivo aspettarsi, le deformazioni più elevate si verificano nell’ipotesi di acquifero medio, ovvero di massima depressurizzazione a fine produzione, con un valore massimo pari a $4 \cdot 10^{-4}$ nel caso C. La ri-pressurizzazione del sistema ad opera

dell'acquifero dopo la fine della produzione, porta le deformazioni volumetriche ad assestarsi nell'intervallo $[2.0 \cdot 10^{-5} \div 2.9 \cdot 10^{-4}]$, in funzione della spinta dell'acquifero e dei valori assegnati ai moduli elastici.

Tab. 3.1 – Deformazioni volumetriche massime.

Caso	Fine produzione primaria	Fine simulazione dinamica
A	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$
B	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$7.0 \cdot 10^{-5}$
C	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$
D	$2.7 \cdot 10^{-4}$	$7.0 \cdot 10^{-5}$
E	$9.0 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$
F	$3.3 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$

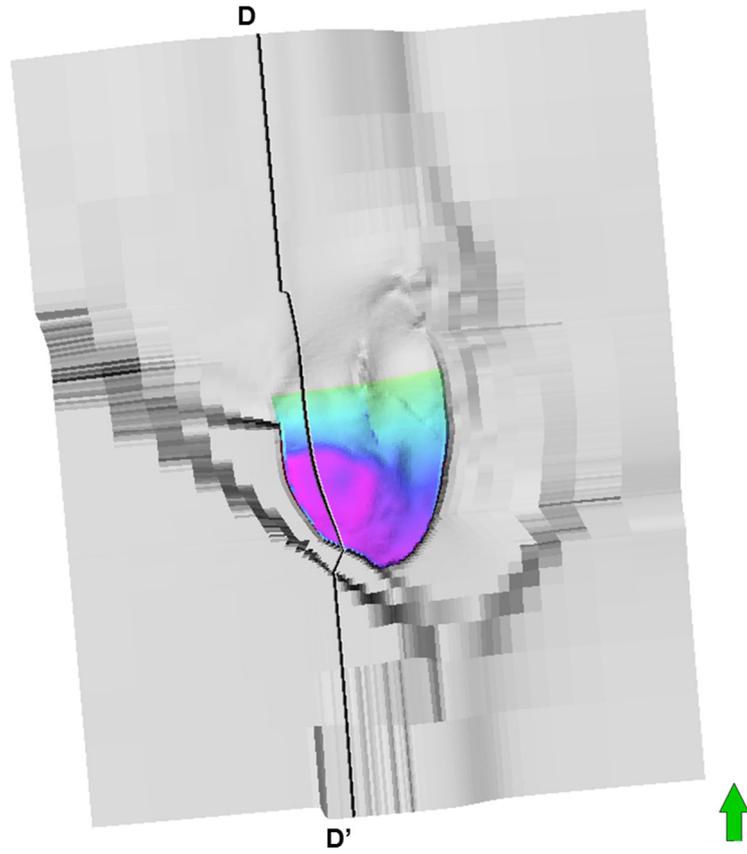


Fig. 3.1 – Sezione di analisi: D-D'.

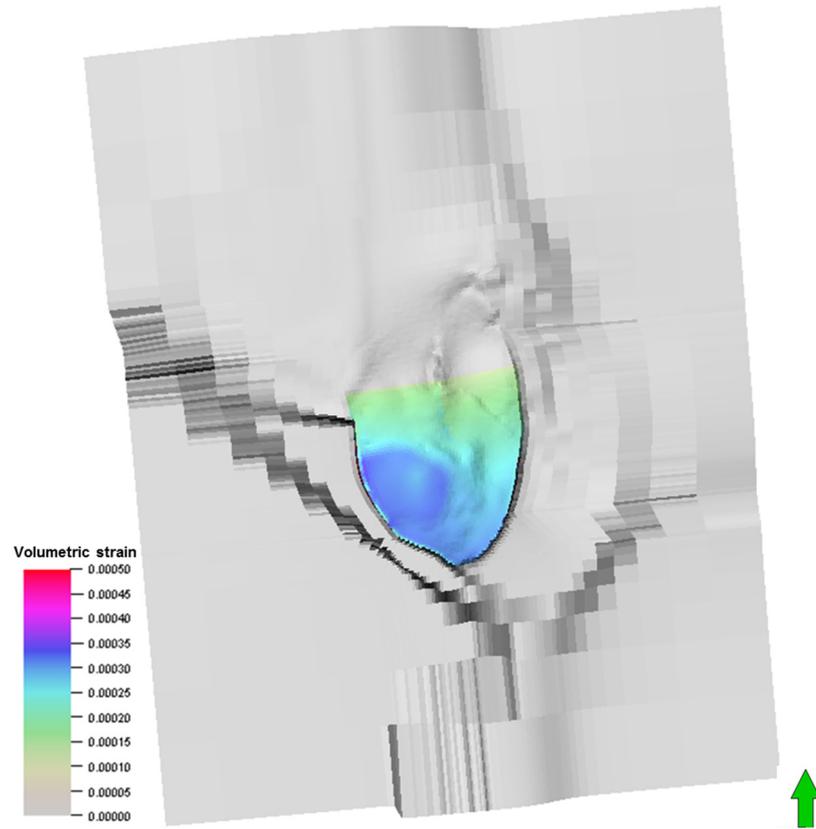


Fig. 3.2 – Caso A: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della produzione primaria.

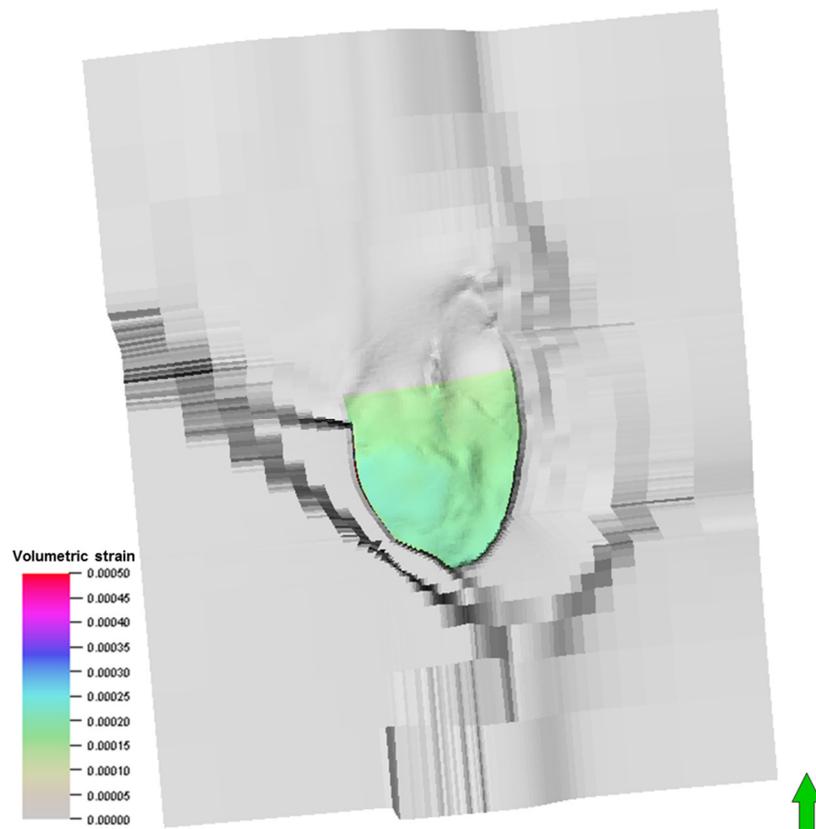


Fig. 3.3 – Caso A: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della simulazione dinamica.

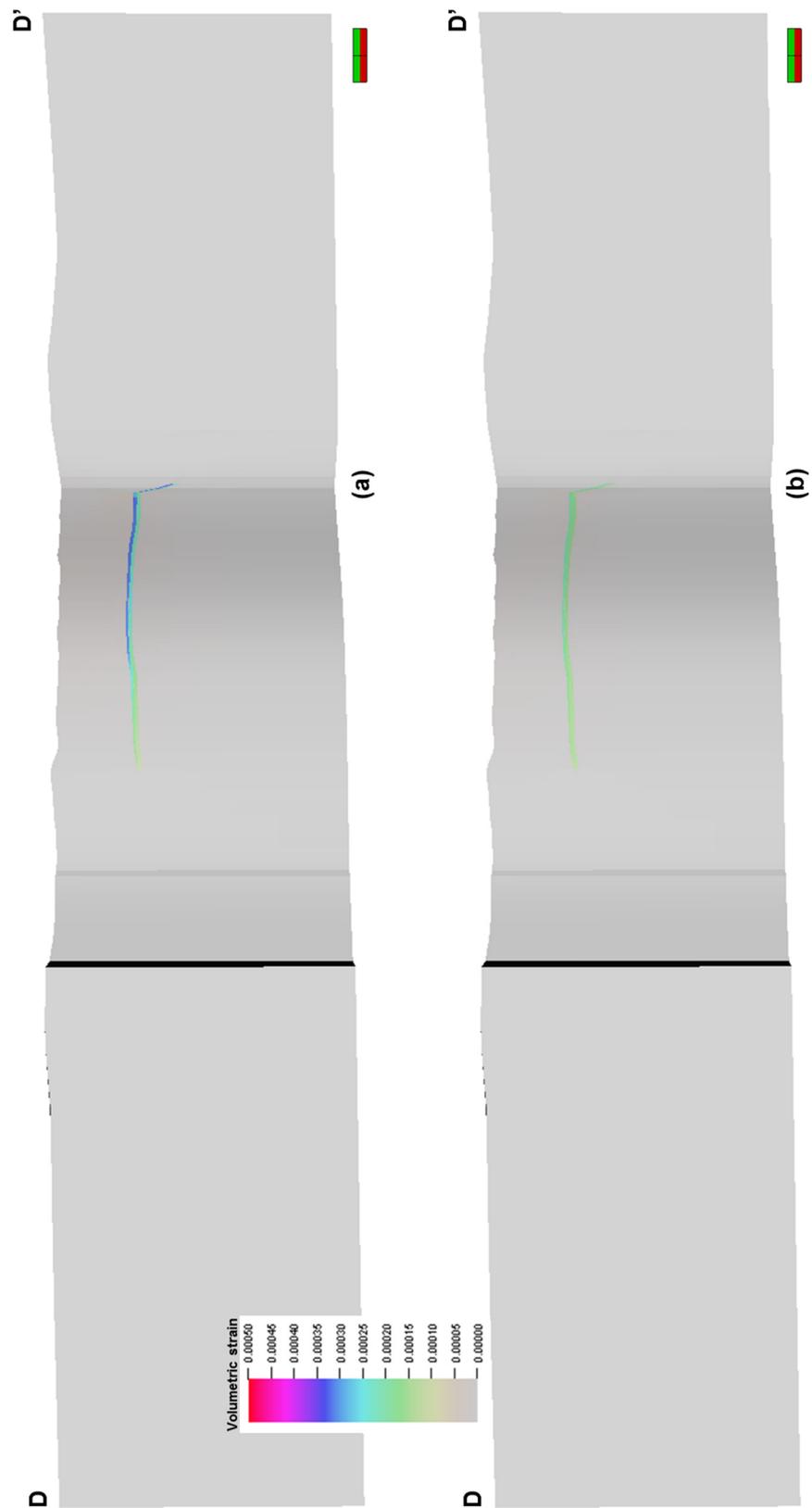


Fig. 3.4 – Caso A – sezione D-D': deformazioni volumetriche (a) alla fine della produzione primaria e (b) alla fine della simulazione dinamica.

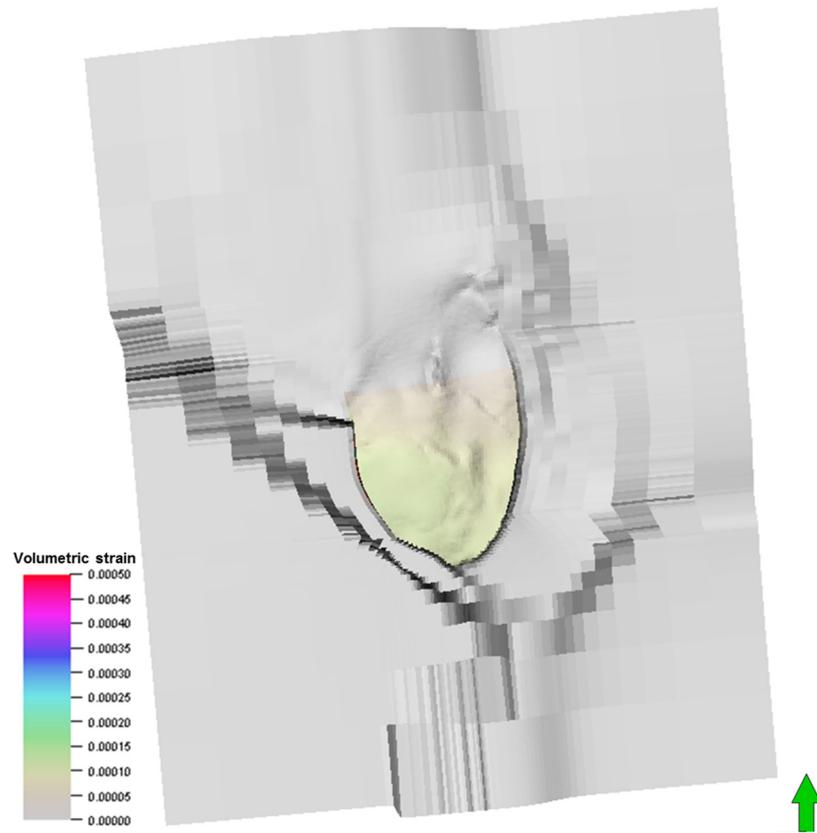


Fig. 3.5 – Caso B: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della produzione primaria.

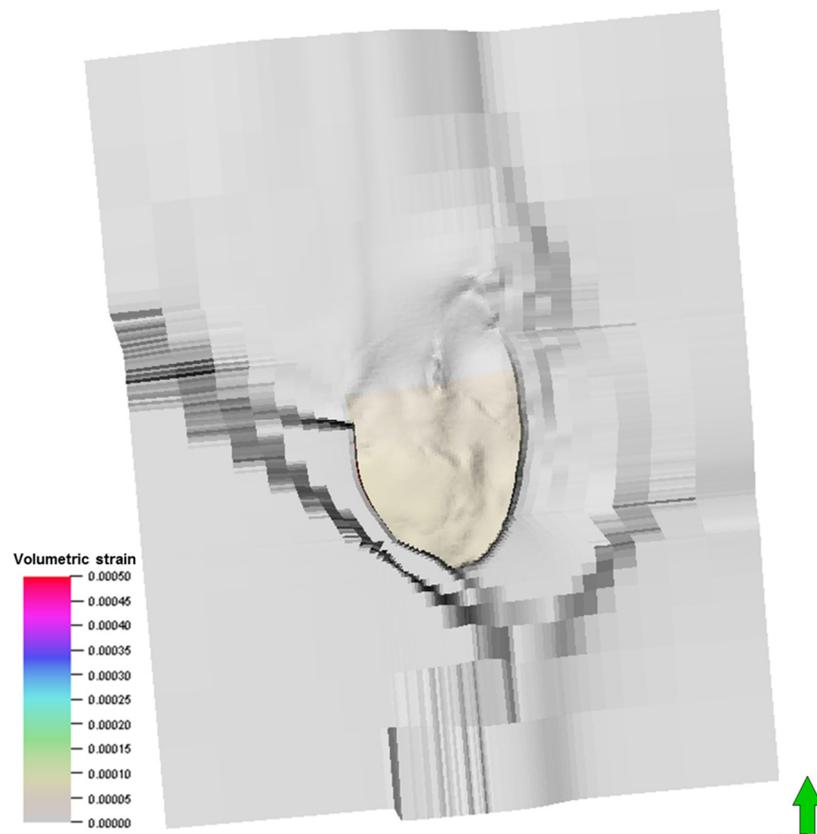


Fig. 3.6 – Caso B: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della simulazione dinamica.

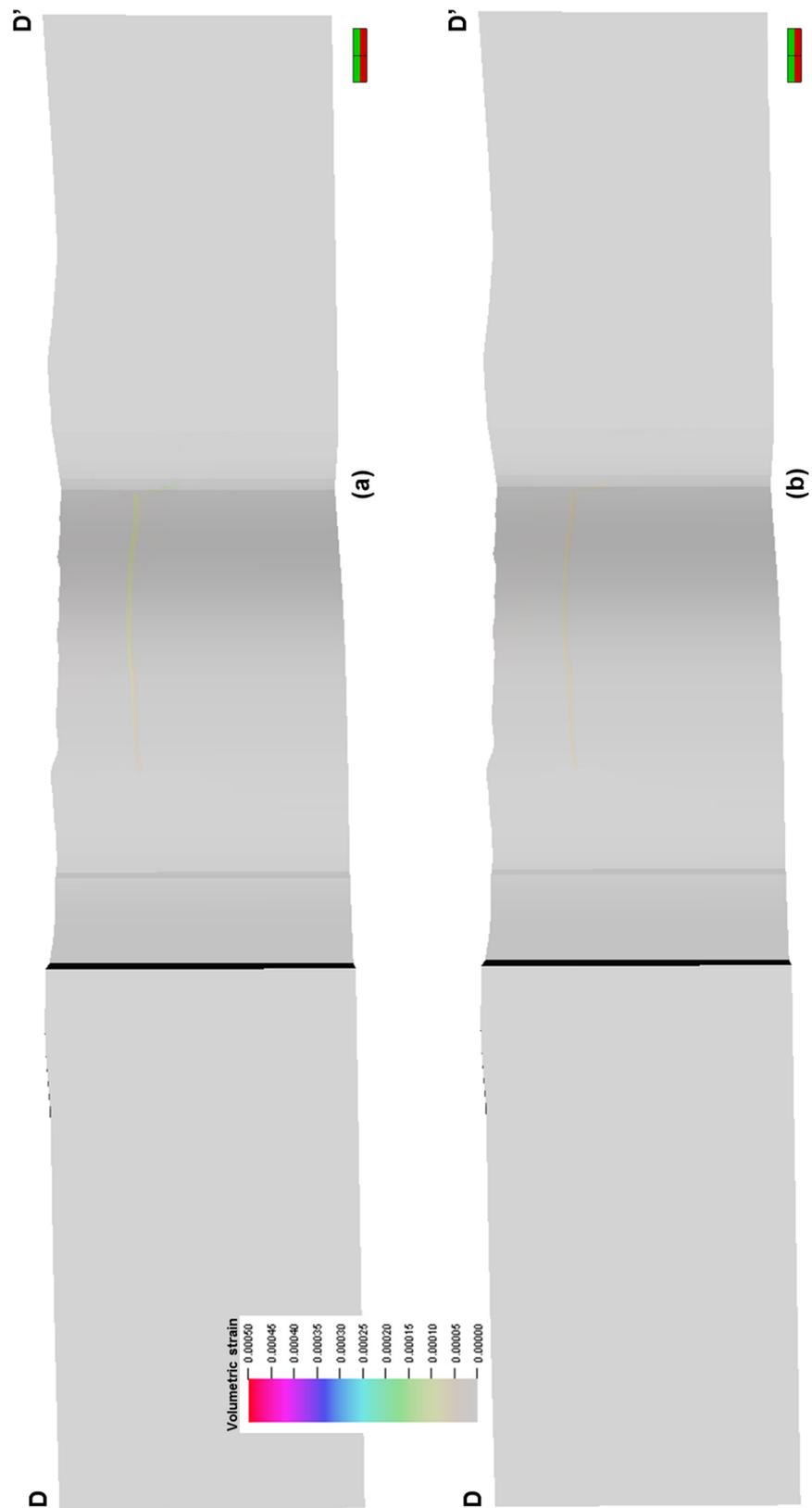


Fig. 3.7 – Caso B – sezione D-D': deformazioni volumetriche (a) alla fine della produzione primaria e (b) alla fine della simulazione dinamica.

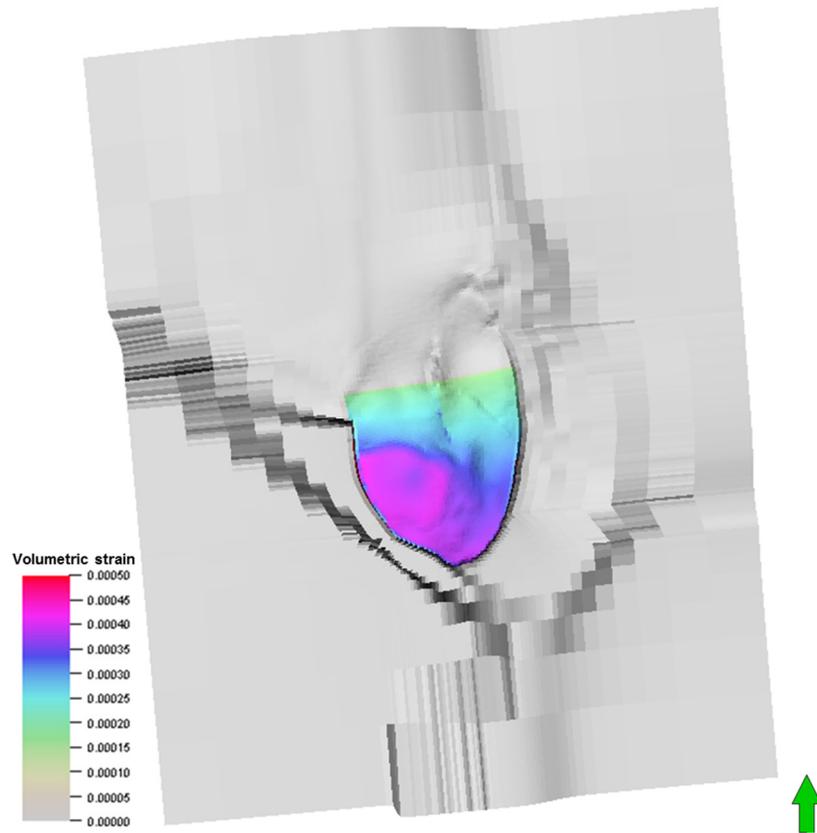


Fig. 3.8 – Caso C: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della produzione primaria.

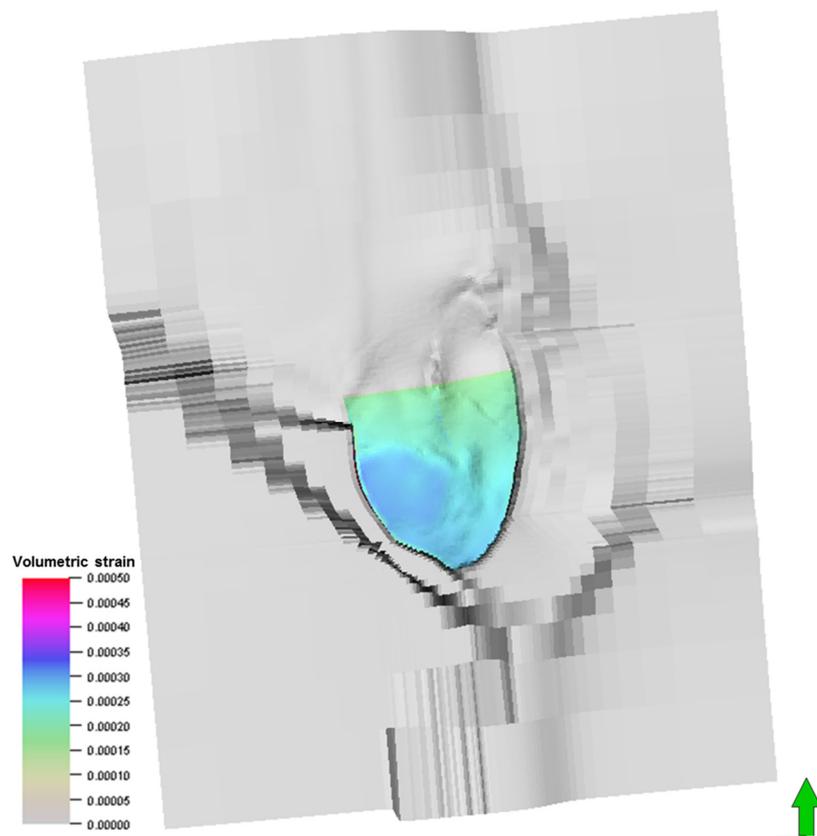


Fig. 3.9 – Caso C: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della simulazione dinamica.

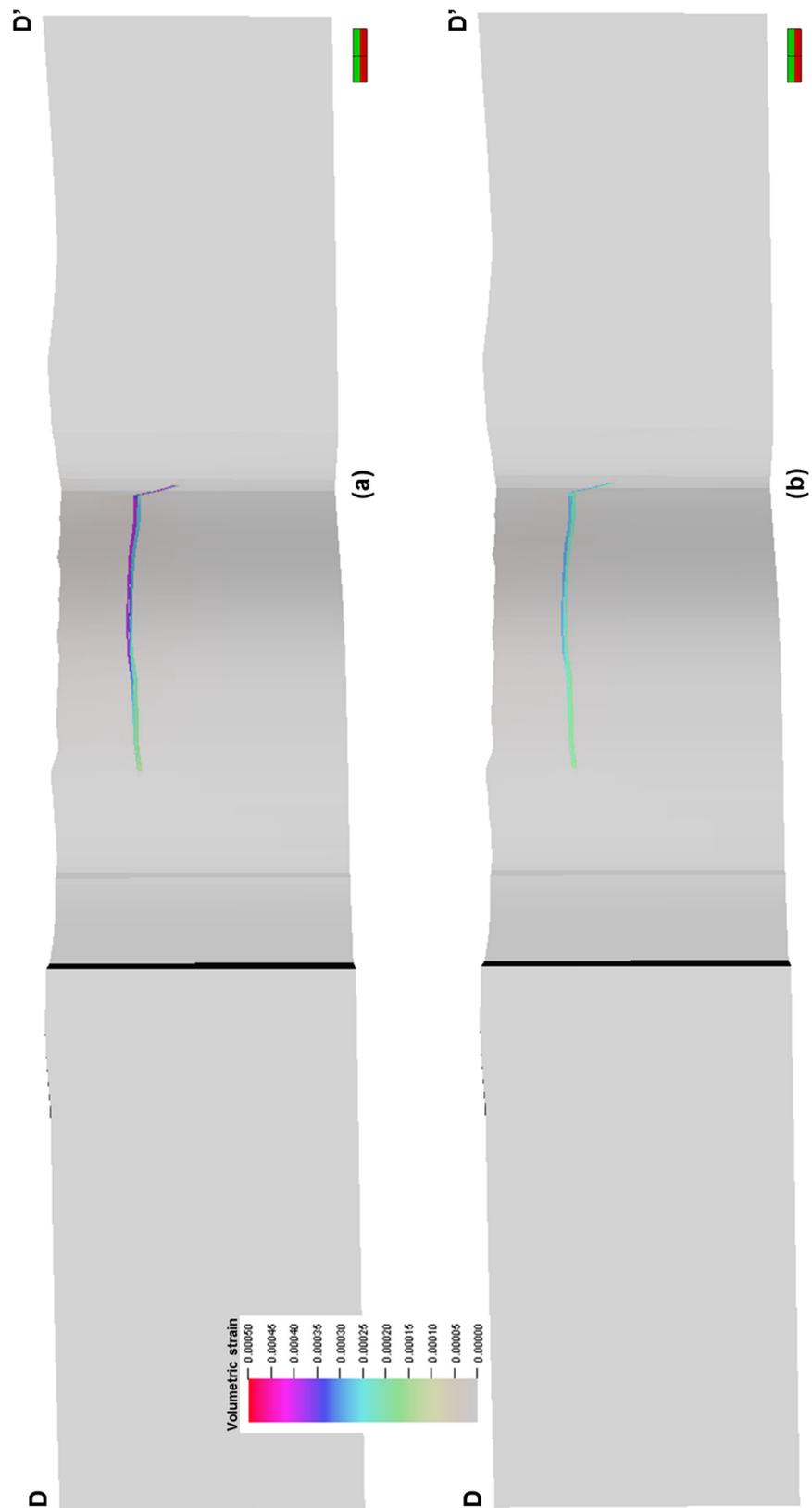


Fig. 3.10 – Caso C – sezione D-D': deformazioni volumetriche (a) alla fine della produzione primaria e (b) alla fine della simulazione dinamica.

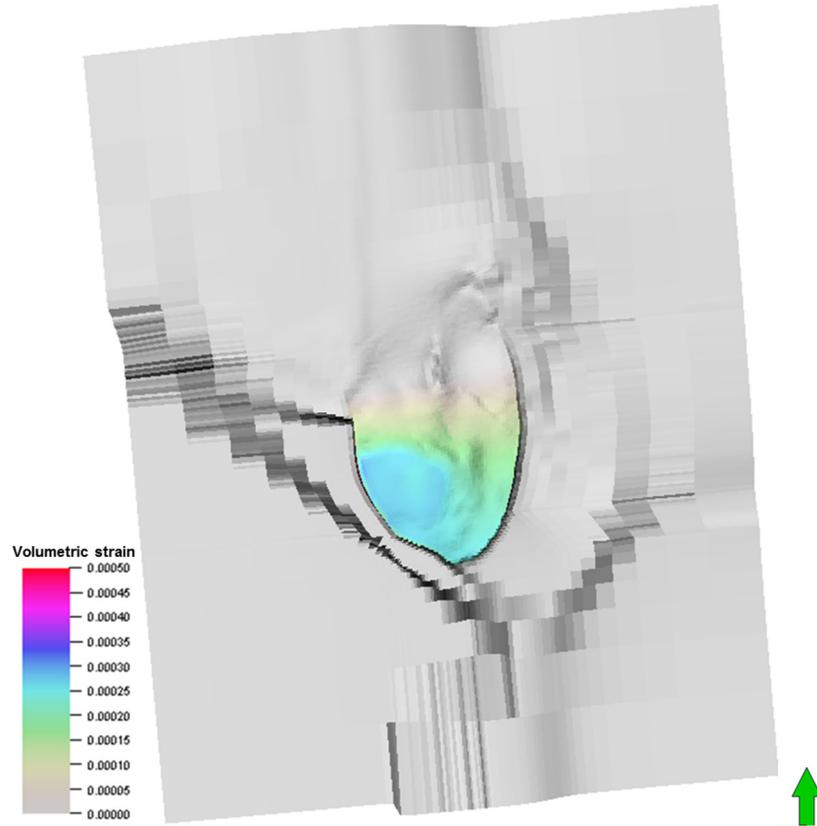


Fig. 3.11 – Caso D: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della produzione primaria.

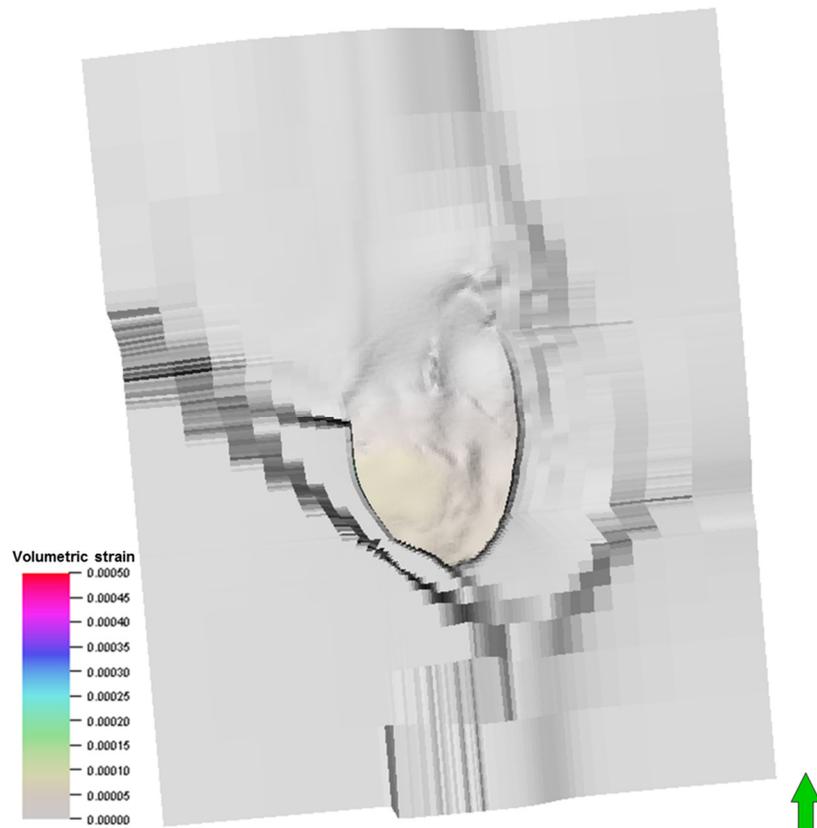


Fig. 3.12 – Caso D: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della simulazione dinamica.

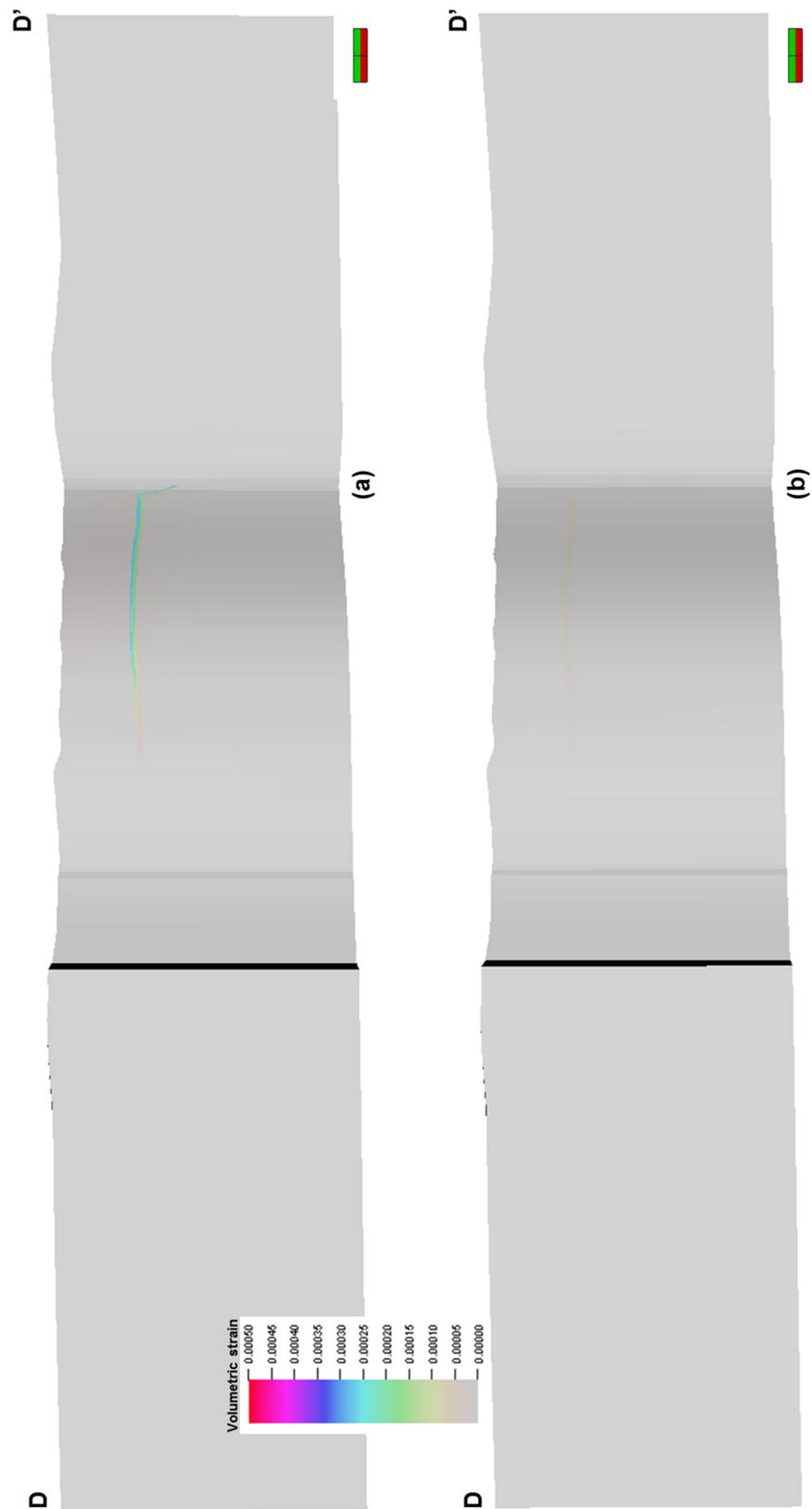


Fig. 3.13 – Caso D – sezione D-D': deformazioni volumetriche (a) alla fine della produzione primaria e (b) alla fine della simulazione dinamica.

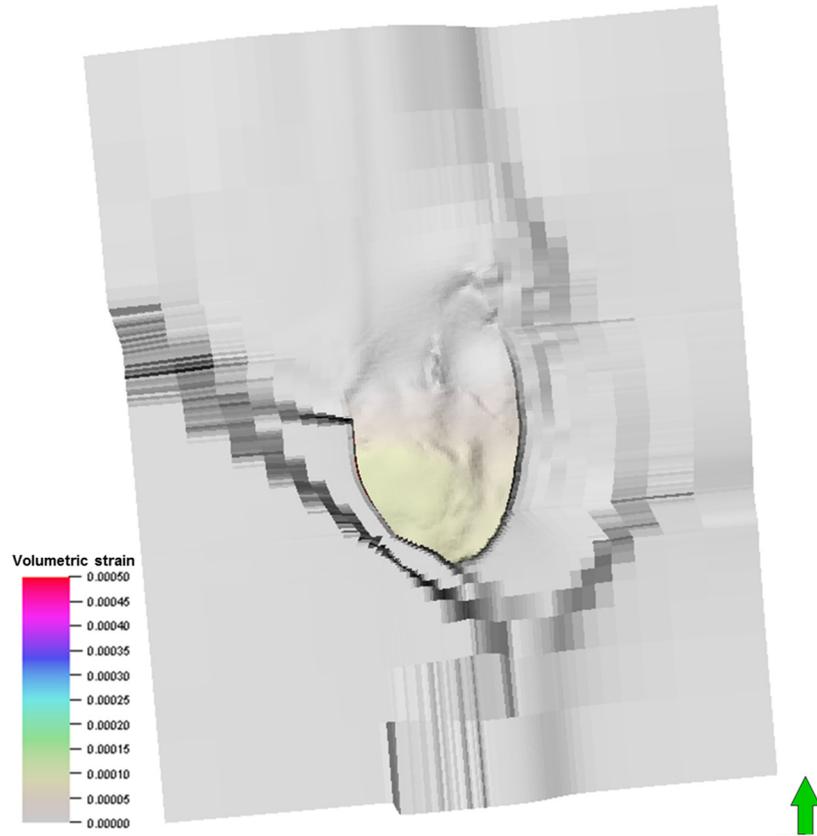


Fig. 3.14 – Caso E: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della produzione primaria.

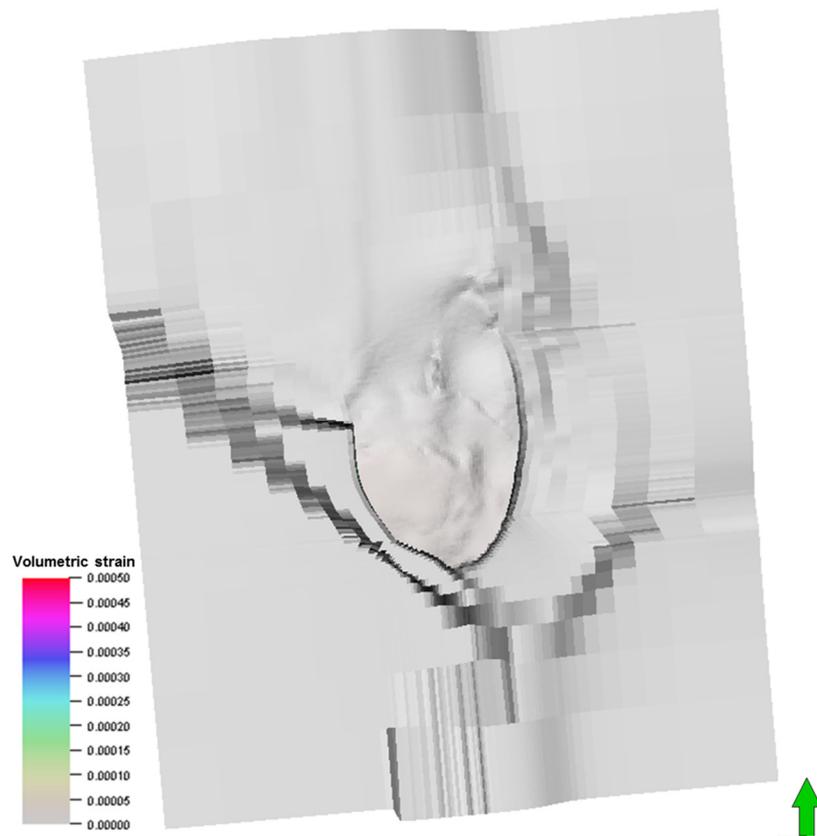


Fig. 3.15 – Caso E: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della simulazione dinamica.

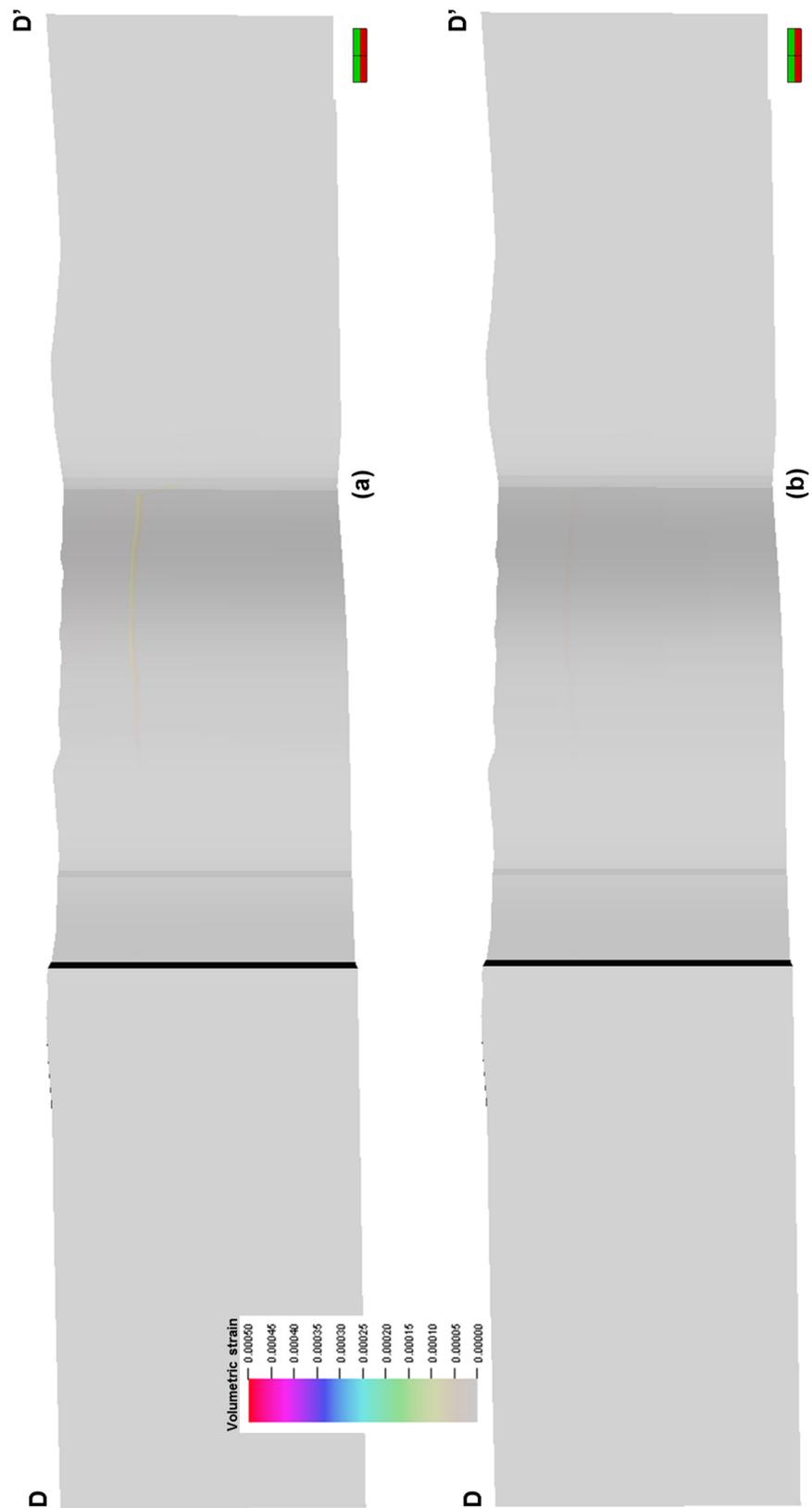


Fig. 3.16 – Caso E – sezione D-D': deformazioni volumetriche (a) alla fine della produzione primaria e (b) alla fine della simulazione dinamica.

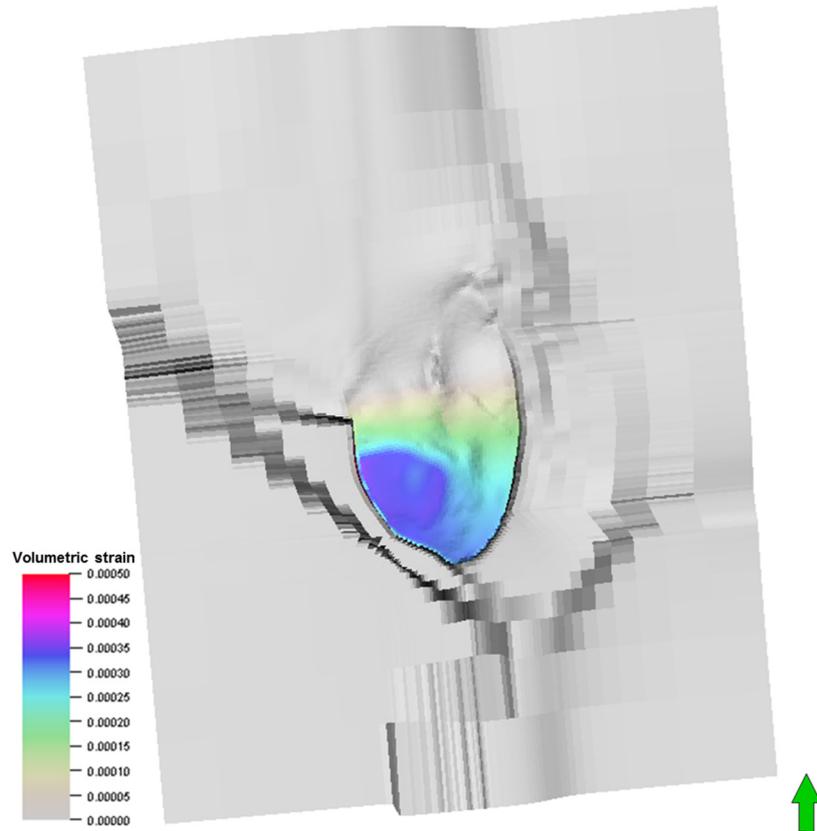


Fig. 3.17 – Caso F: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della produzione primaria.

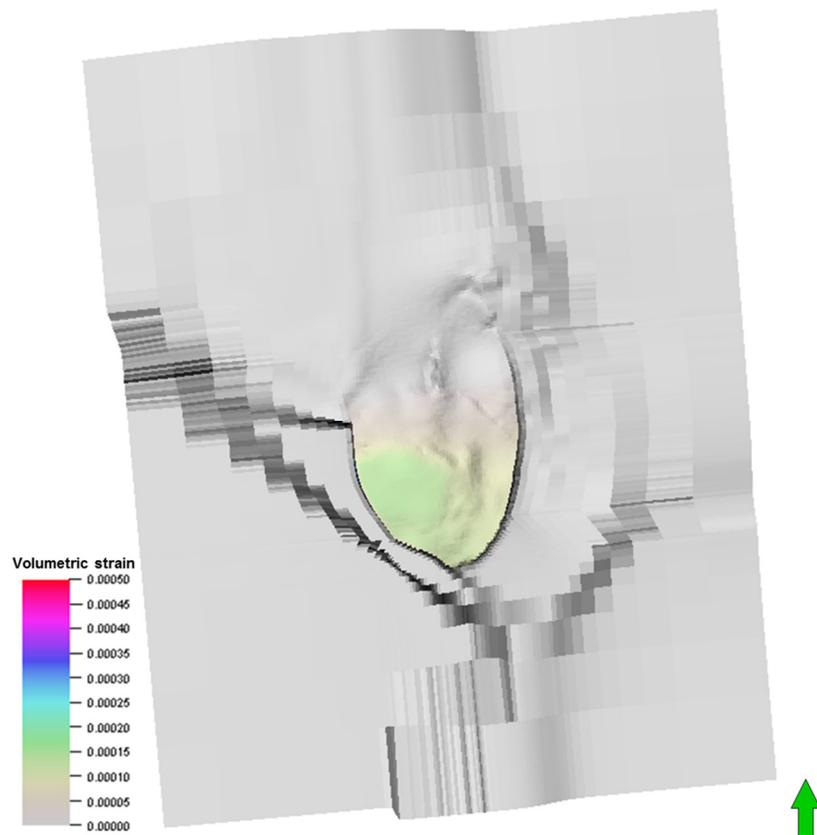


Fig. 3.18 – Caso F: deformazioni volumetriche in giacimento alla fine della simulazione dinamica.

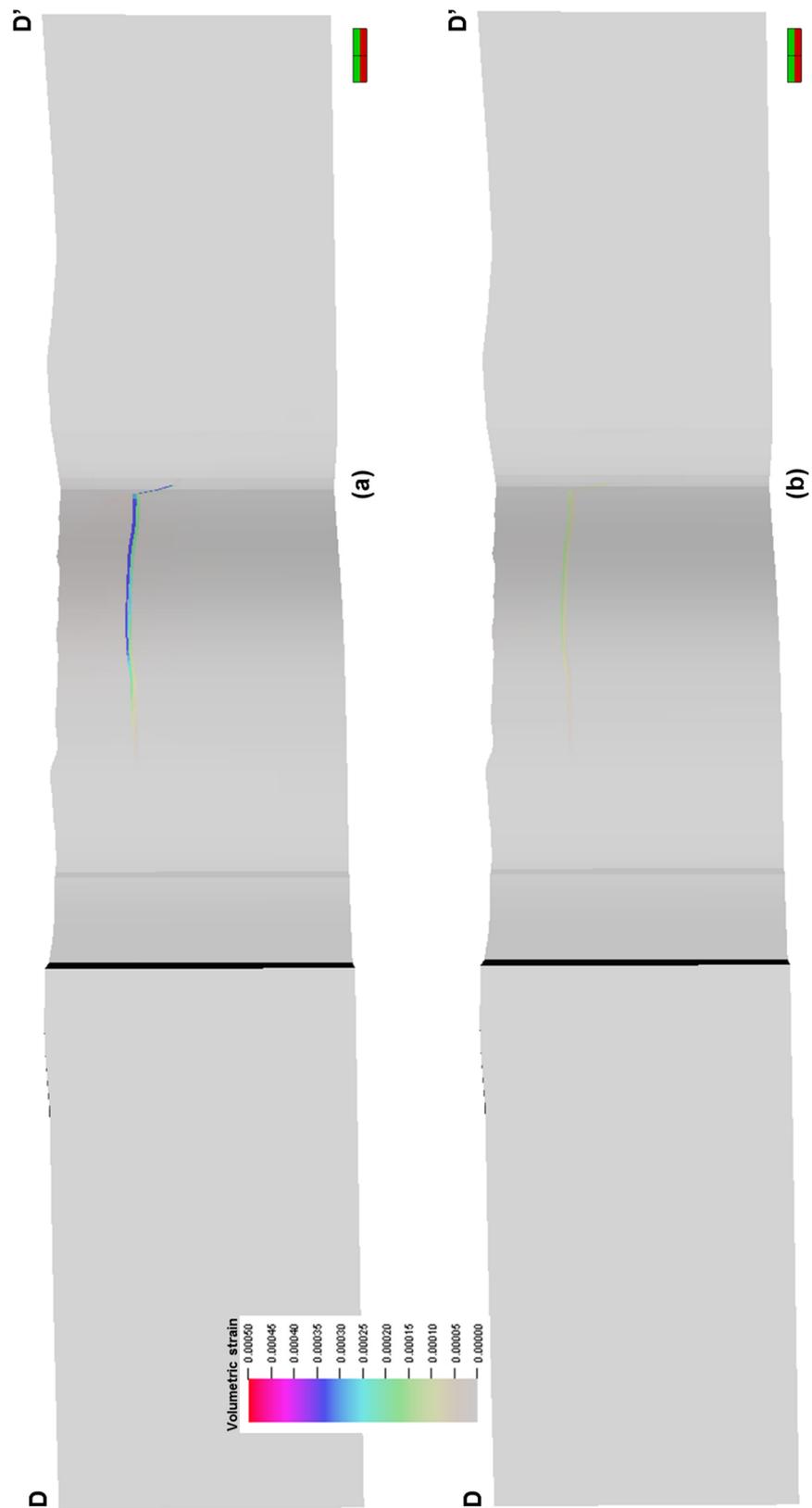


Fig. 3.19 – Caso F – sezione D-D': deformazioni volumetriche (a) alla fine della produzione primaria e (b) alla fine della simulazione dinamica.

4 BIBLIOGRAFIA

DREAM s.r.l.. "CAMPO DI COLLE SANTO - Studio della subsidenza indotta dalla futura produzione del campo", Maggio 2016.

Fjaer, Holt, Horsrud, Raaen & Risnes, 2008. Petroleum related Rock Mechanics, 2nd edition, Elsevier, Oxford.

Lancellotta, 1991. Geotecnica. Zanichelli.

Zoback, 2007 Reservoir Geomechanics, Cambridge University Press, New York.