



ALLEGATO PARTE I_04

101SBT-01-GCO-RE-00004_REV00

**ISTANZA DI
CONCESSIONE DI STOCCAGGIO GAS
NATURALE
“SAN BENEDETTO STOCCAGGIO”**

**INTEGRAZIONI
allo Studio di Impatto Ambientale**

PUNTO 5:

**ANALISI DEL FENOMENO DELLA SUBSIDENZA
NELLA REGIONE DI INTERESSE**

PUNTO 6:

**SIMULAZIONI MODELLISTICHE RELATIVAMENTE
ALLE PRESSIONI DI IMMISSIONE PER VALUTARE
LA CAPACITA' DI STOCCAGGIO, LA TENUTA DEL
GIACIMENTO ED IL COMPORTAMENTO SOTTO
SFORZO DELLE ROCCE COSTITUENTI SERBATOIO
E IL CAP-ROCK, CON VERIFICA DEGLI STATI
LIMITE**



Campo di San Benedetto

**STUDIO GEOMECCANICO PER LO STOCCAGGIO
SOTTERRANEO DEL GAS NATURALE NELLA
FORMAZIONE MONTEPAGANO**

Responsabile: Prof. Ing. F. Verga

Luglio 2011



INDICE

1. MODELLO STATICO A SCALA REGIONALE	1
1.1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO	1
1.2. DATASET	1
1.3. MODELLO STRUTTURALE	2
1.4. STRATIGRAFIA	2
1.5. CORRELAZIONE STRATIGRAFICA.....	3
1.6. RICOSTRUZIONE GEOLOGICA 3D.....	4
2. SIMULAZIONI DEL COMPORTAMENTO DINAMICO DEL GIACIMENTO	6
2.1. DATI GENERALI DEL GIACIMENTO.....	6
2.2. MODELLO DINAMICO	6
3. STUDIO GEOMECCANICO.....	8
3.1 DESCRIZIONE DEL SOFTWARE VISAGE	8
3.2 DEFINIZIONE DEL MODELLO	9
3.2.1 <i>Grid</i>	9
3.2.2 <i>Classificazione geomeccanica</i>	9
3.2.3 <i>Caratterizzazione geomeccanica</i>	11
3.2.3.1 Parametri di deformabilità dei mezzi porosi	11
3.2.3.2 Parametri di resistenza dei mezzi porosi	14
3.2.4 <i>Faglie</i>	15
3.3 INIZIALIZZAZIONE	15
3.4 ANALISI DELL'EVOLUZIONE DEL CAMPO TENSO-DEFORMATIVO	16
3.4.1 <i>Principi di analisi</i>	16
3.4.2 <i>Analisi effettuate</i>	16
3.5 EVOLUZIONE DEL CAMPO TENSIONALE NEL "CASO STATICO"	18
3.5.1 <i>Time steps di analisi</i>	18
3.5.2 <i>Produzione primaria – F.ne Montepagano</i>	19
3.5.3 <i>Ricostituzione iniziale a $p=p_i$ - F.ne Montepagano</i>	20
3.5.4 <i>Ciclo ordinario di stoccaggio - F.ne Montepagano</i>	21
3.5.5 <i>Produzione primaria – F.ne Alternanze</i>	22
3.6 SUBSIDENZA.....	22
3.7 CONSIDERAZIONI GENERALI	24
4. TENUTA IDRAULICA DELLA COPERTURA	26
5. BIBLIOGRAFIA.....	27



1. MODELLO STATICO A SCALA REGIONALE

1.1. Inquadramento geologico

Il campo di San Benedetto, facente parte della concessione San Benedetto del Tronto, è situato nelle Marche in provincia di Ascoli Piceno (fig. 1). Il giacimento, scoperto nel 1980, è costituito da due formazioni indipendenti mineralizzate a gas: f.ne Montepagano (livelli MP1z, MP1 e MP2) e f.ne Alternanze (livelli da SB1 a SB21).

Le due formazioni oggetto del presente studio sono entrambe di origine torbiditica, ma sono differenti per associazione di facies e caratteristiche petrofisiche. La f.ne Montepagano è una sequenza di tipo torbiditico di facies prossimale, caratterizzata da una sedimentazione più irregolare e discontinua delle sabbie sia in senso verticale che laterale. La f.ne Alternanze è una sequenza di tipo torbiditico in facies distale, caratterizzata da una fitta alternanza di corpi sabbiosi e argilla che presentano una continuità decisamente più elevata rispetto ai livelli della f.ne Montepagano. Tutta la serie è stata coinvolta nell'intensa tettonica compressiva legata all'avanzamento della catena appenninica verso Est. In particolare, il giacimento di San Benedetto si trova all'interno di una struttura formata da un'anticlinale sovrascorsa con direzione NNW-SSE e vergenza E-NE.

La profondità media della f.ne Montepagano è approssimativamente di 2450 m ss, mentre la f.ne Alternanze si trova ad una profondità di circa 3000 m ss.

La f.ne Montepagano risulta costituita da tre livelli: i livelli MP1z e MP1 risultano più superficiali e separati da un setto siltoso che ostacola la comunicazione idraulica tra di essi, mentre il livello MP2, più profondo, presenta una scarsa mineralizzazione ed un limitato interesse minerario. La f.ne Alternanze risulta costituita da 21 livelli, denominati SB1 - SB21, di cui i primi 18 originariamente mineralizzati a gas.

La mineralizzazione in entrambe le formazioni è limitata a nord, est e ovest da faglie.

1.2. Dataset

Nel seguito sono riportati i dati disponibili per il presente studio:

- Traiettorie e profili 1:1000 dei pozzi San Benedetto 1dir, San Benedetto 2dir, San Benedetto 4dir, San Benedetto 5dir, Aquilino 1, Porto d'Ascoli 1;
- Set di log per i pozzi San Benedetto 1dir, San Benedetto 2dir, San Benedetto 4dir, San Benedetto 5dir, costituito da *caliper*, potenziale spontaneo, *gamma-ray*, resistività, porosità neutronica, densità e log sonico.



- Set di *checkshot* relativi ai pozzi San Benedetto 1 dir, San Benedetto 2dir, San Benedetto 4dir, San Benedetto 5dir
- Top del livello MP1, in profondità
- Geometrie di faglia
- Set di linee sismiche migrate

1.3. Modello strutturale

Il modello strutturale è stato definito sulla base dei risultati dell'analisi delle sezioni sismiche disponibili. Sono stati identificati quattro lineamenti tettonici principali, di rilevanza regionale per estensione e/o rigetto, ma importanti anche alla scala del giacimento (fig. 2). Il *reservoir* risulta ubicato all'interno di un blocco, aperto a sud, delimitato da due *thrust* principali, immergenti a ovest e con andamento nord-sud (*thrust* orientale) e nord est-sud ovest (*thrust* occidentale). Il *thrust* orientale delimita la mineralizzazione dei livelli MP1z e MP1 (formazione Montepagano) ad est, mentre il *thrust* occidentale delimita l'acquifero. All'interno del blocco principale un *backthrust*, con orientazione nord ovest-sud est e immergente verso est, delimita a est la mineralizzazione dei livelli San Benedetto (formazione Alternanze).

1.4. Stratigrafia

La stratigrafia dell'area è stata dedotta dal profilo 1:1000 relativo al pozzo San Benedetto 1dir e risulta così definita:

0-100 m: Alluvium

100-1400 m: Argilla grigio-chiara fossilifera siltoso-sabbiosa con tracce di mica e pirite (formazione 'Argille del Santerno')

1400-1500 m: Intercalazioni di sabbie e argille grigie più o meno sabbiose (formazione 'Carassai')

1500-2020 m: Argilla grigio-chiara fossilifera siltoso argillosa con intercalazioni di arenaria quarzosa a grana fine poco cementata con cemento carbonatico (formazione 'Argille del Santerno')

2020-2220 m: Arenaria quarzosa a grana fine e cemento carbonatico friabile (formazione 'Carassai')

2220-2740 m: Argilla grigio-chiara fossilifera siltoso argillosa con intercalazioni di arenaria quarzosa a grana fine poco cementata con cemento carbonatico (formazione 'Argille del Santerno')

2740-2790 m: Arenaria quarzosa friabile a cemento carbonatico argilloso con lignite abbondante. (formazione Teramo - membro Montepagano)

2790-3200 m: Argilla grigio-chiara fossilifera siltoso argillosa con intercalazioni di arenaria quarzosa a grana fine poco cementata con cemento carbonatico friabile (formazione Teramo)

3200-3320 m: Alternanze di argilla grigia più o meno siltosa sabbiosa poco fossilifera e di sabbia quarzosa a grana fine passante ad arenaria con cemento carbonatico (formazione Teramo – membro Alternanze)

3320-3460 m: Sabbia quarzosa a grana fine grigio marroncina passante ad arenaria con cemento carbonatico e intercalazioni di argilla più o meno siltoso sabbiosa poco fossilifera (formazione Teramo)

3460-3600 m: Argilla grigia più o meno sabbiosa poco fossilifera con intercalazioni di sabbia quarzosa a grana fine grigio marroncina passante ad arenaria con cemento carbonatico (formazione Teramo)

1.5. Correlazione stratigrafica

Le principali unità stratigrafiche, come da profilo 1:1000 relativo al pozzo San Benedetto 1dir, sono ben riconoscibili e quindi correlabili ai pozzi considerati nel presente studio (fig. 3).

Ai fini della ricostruzione 3D dei principali rapporti stratigrafico-strutturali delle sequenze a scala regionale, l'analisi stratigrafica al pozzo è stata integrata con il dato sismico. In particolare sono state interpretate due superfici sismiche (fig. 4), ubicate nella porzione di sequenza più superficiale rispetto alla zona *reservoir*, che rappresentano rispettivamente:

- La discordanza osservata nella parte inferiore delle Argille del Santerno; non essendo interessata da fenomeni dislocativi, tale discordanza può essere considerata come la base della sequenza che sigilla i lineamenti tettonici che interessano la zona *reservoir*;
- Una superficie di conformità ubicata a circa 1400 ms (TWT), necessaria per descrivere lo sviluppo stratigrafico della sequenza sovrastante la discordanza.

Le due superfici sono quindi state convertite in profondità. Il modello di velocità utilizzato è stato definito a partire dai *log* sonici disponibili per i pozzi San Benedetto, calibrati ai relativi *checkshots*.

1.6. Ricostruzione geologica 3D

Il modello statico di giacimento relativo alle formazioni Montepagano e Alternanze, esteso a scala regionale e all'intera sequenza stratigrafica soprastante, è stato realizzato con il software Petrel commercializzato dalla società Schlumberger.

Il *grid* del modello statico è stato generato in modo da soddisfare i requisiti della simulazione geomeccanica: l'estensione del volume modellizzato permette di descrivere l'intera sequenza litologica nell'area di interesse ed è tale da garantire condizioni di bordo indisturbate. Inoltre, per ottenere un buon livello di descrizione dei fenomeni oggetto di studio è necessario ricorrere ad una discretizzazione sufficientemente fitta della zona di reservoir, della cap rock e delle formazioni limitrofe, maggiormente interessate dalle variazioni tensionali indotte dalla produzione e dai cicli di stoccaggio. In genere anche tutte le formazioni sovrastanti la cap rock sono descritte con un buon livello di dettaglio, poiché giocano un ruolo rilevante nell'analisi dei fenomeni deformativi. Le zone periferiche del modello, soprattutto le formazioni di bottom e quelle laterali rispetto al giacimento, non hanno particolare importanza per lo studio del comportamento del sistema, ma servono a garantire condizioni indisturbate al contorno del modello.

Inoltre, il *grid* è stato generato in conformità a criteri che consentissero la generazione di geometrie regolari in modo da agevolare la stabilità del modello dal punto di vista della simulazione geomeccanica.

L'area modellizzata presenta un'estensione di 13 km in direzione est-ovest e 15 km in direzione nord-sud, per uno spessore complessivo di circa 6000 m (fig. 5).

Nella zona centrale, ovvero in corrispondenza del giacimento, è stata realizzata una discretizzazione raffittita con celle di dimensioni di 100x100 metri, mentre nelle zone circostanti l'area di maggior interesse è stata adottata una discretizzazione più lasca, con dimensioni delle celle crescenti secondo una progressione geometrica a partire dalla zona *reservoir*. In direzione I e J, il grid risulta costituito da 63x73 celle. L'integrazione degli elementi strutturali nel *grid* è stata effettuata utilizzando la tecnica '*stairs-step*', che consente di mantenere una geometria delle celle regolare. In virtù delle dimensioni di cella scelte per la zona di *reservoir* si è così ottenuta una geometria finale delle faglie rappresentativa per gli scopi del presente studio.

Verticalmente la zonazione geologica è stata ricostruita a partire dagli orizzonti sismici interpretati, ovvero le due superfici di cui al paragrafo 1.4 e il *top* del livello MP1 (fig. 6), ovvero il *top reservoir* della formazione 'Montepagano'. Gli orizzonti relativi ai livelli



reservoir della formazione 'Alternanze' (fig. 7) sono stati ricostruiti utilizzando i dati di pozzo (fig. 8) e il *top* MP1. La zonazione geologica è stata quindi raffittita allo scopo di poter descrivere adeguatamente il comportamento geomeccanico delle rocce. Complessivamente, sono stati definiti 74 livelli. Il *grid* (fig. 9) così definito risulta quindi costituito da 340326 celle.

2. SIMULAZIONI DEL COMPORTAMENTO DINAMICO DEL GIACIMENTO

2.1. Dati generali del giacimento

La pressione originale della formazione Montepagano era pari a 297.04 Barsa alla profondità (*datum depth*) di 2456 m TVD ss, mentre quella della f.ne Alternanze era pari a 484.2 Barsa alla profondità (*datum depth*) di 2965 m TVD ss.

La formazione Montepagano è stata messa in produzione nell'agosto 1986 attraverso la stringa corta del pozzo SB-5D, aperta nel livello MP1, e attraverso la stringa lunga dello stesso pozzo, aperta nel livello MP2. Nel luglio 1987 il livello MP2 è stato escluso e la stringa lunga è stata ricompletata nel livello MP1z. La stringa lunga (livello MP1z) è stata chiusa nel febbraio del 2000 per pareggio di pressione al collettore, mentre la stringa corta (livello MP1) risultava ancora aperta, ma in coda di produzione a marzo 2010. La produzione cumulativa di gas al 01/03/2010 è di $704 \cdot 10^6 \text{ m}^3_{\text{sc}}$ ($2.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3_{\text{sc}}$ dal livello MP2, $611.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3_{\text{sc}}$ dal livello MP1, e $90.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3_{\text{sc}}$ dal livello MP1z). La formazione Alternanze è stata messa in produzione nell'agosto 1986 attraverso la stringa corta del pozzo SB-1D (livello SB6). Dopo il *workover* del 1989, la produzione è continuata nei livelli SB4-5 (stringa corta) e nel livello SB18 (stringa lunga). Nel settembre 1994 è stato effettuato un ulteriore *work-over* del pozzo per aprire alla produzione, attraverso la stringa lunga, i livelli SB16 e SB17.

Entrambe le stringhe sono state chiuse nel 1996 per pareggio di pressione. Nel periodo tra ottobre 1996 e ottobre 1997 il pozzo è stato ricompletato in singolo selettivo, escludendo i livelli più profondi ed è stato aperto nuovamente alla produzione nel novembre 1997 sui livelli SB7-SB9 e SB10-SB15. Nel giugno 2002 il pozzo è stato chiuso per pareggio di pressione al collettore. Un tentativo di riapertura del pozzo nel 2009 non ha dato esito favorevole.

La produzione cumulativa di gas al 01/03/2010 è di $442.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3_{\text{sc}}$ ($36.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3_{\text{sc}}$ dal livello SB6, $144.1 \cdot 10^6 \text{ m}^3_{\text{sc}}$ dai livelli SB4-5, $148.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3_{\text{sc}}$ dai livelli SB16-18, e $113.1 \cdot 10^6 \text{ m}^3_{\text{sc}}$ dai livelli SB7-SB9 e SB10-SB15).

2.2. Modello dinamico

Il modello dinamico è stato costruito utilizzando il *software* Eclipse 100 (*black oil*), commercializzato dalla società Schlumberger.

Il modello dinamico complessivo comprende entrambe le formazioni mineralizzate del campo (Montepagano ed Alternanze). Le simulazioni dinamiche hanno riguardato entrambe le formazioni nella fase di produzione primaria e unicamente la formazione Montepagano nella successiva fase di conversione allo stoccaggio.



Le simulazioni dinamiche hanno avuto l'obiettivo di definire l'evoluzione del campo delle pressioni interstiziali, sia durante la fase storica di produzione primaria sia durante le future attività di stoccaggio del gas, per valutare l'evoluzione nel tempo del campo delle deformazioni e degli sforzi a scala regionale.

Sono state quindi generate le mappe delle pressioni interstiziali in corrispondenza delle fasi temporali più significative per l'analisi del comportamento geomeccanico delle formazioni. In particolare le mappe di pressione sono state definite in corrispondenza della fine della produzione primaria, al termine del periodo di ricostituzione del giacimento alla pressione di scoperta e all'inizio e alla fine di un ciclo di stoccaggio tipo.

3. STUDIO GEOMECCANICO

L'obiettivo dello studio geomeccanico è stato quello di valutare l'evoluzione del campo degli sforzi, le deformazioni e gli spostamenti indotti dalla produzione primaria di gas avvenuta dalle formazioni Montepagano e Alternanze e, soprattutto, dalla futura riconversione allo stoccaggio della formazione Montepagano. Per questo scopo è stata condotta una modellazione ad elementi finiti in campo tridimensionale con il codice di calcolo Visage, previa la caratterizzazione geomeccanica delle formazioni interessate dalla produzione e dalle future attività di stoccaggio nonché di tutta la sequenza stratigrafica soprastante.

La caratterizzazione geomeccanica è stata svolta per stimare le proprietà di deformabilità e resistenza delle formazioni interessate dalla produzione e dalle attività di stoccaggio del gas naturale. La modellazione numerica ha richiesto la discretizzazione del volume di interesse secondo un reticolo sufficientemente fitto, particolarmente dettagliato nelle zone a maggior gradiente tensionale, in modo tale da eliminare o quantomeno minimizzare eventuali problemi di convergenza numerica.

La prima fase della modellazione è stata quella di assegnare alla struttura le tensioni iniziali gravitative. Sono state quindi simulate le fasi di produzione primaria e della futura attività di stoccaggio. In relazione ai cicli di stoccaggio è stata valutata la risposta del modello in corrispondenza di una pressione massima di iniezione pari alla pressione iniziale della formazione Montepagano, nonché di una pressione minima di testa pozzo (THP_{min}) pari a 75 barsa, che potrebbe rappresentare il valore limite durante la fase di svaso. Questa analisi ha permesso di verificare non solo la sicurezza del sistema, ma anche di stimare le variazioni altimetriche del piano campagna tra le condizioni di fine svaso e le condizioni di massimo invaso previste.

3.1 Descrizione del software Visage

Il modello geomeccanico è stato realizzato con il simulatore Visage, commercializzato dalla società Schlumberger. Il software è stato concepito nell'ottica di una completa integrazione con gli studi di giacimento, poiché è totalmente compatibile con i software Petrel ed Eclipse, della stessa società, che consentono rispettivamente la costruzione del modello statico e la simulazione fluidodinamica.

Basandosi su un approccio ad elementi finiti (FEM), Visage consente di generare modelli numerici per analisi sia di tipo puramente geomeccanico, sia di tipo accoppiato geomeccanico-fluidodinamico. L'approccio accoppiato è in grado di simulare la risposta di una formazione mineralizzata combinando l'aspetto dinamico, per l'analisi del moto dei fluidi nel mezzo poroso, e l'aspetto geomeccanico, per lo studio del comportamento tenso-deformativo dello stesso ammasso roccioso. L'accoppiamento avviene attraverso alcuni parametri, quali porosità e permeabilità, sensibili alle variazioni sia di pressione

interstiziale, sia dello stato tensionale della formazione. L'approccio accoppiato risulta quindi particolarmente utile nel settore petrolifero poiché permette di valutare gli effetti delle attività di produzione e di stoccaggio sia sullo stato tensionale della rocce, allo scopo di verificare che non venga compromessa l'integrità delle formazioni, in particolare della copertura, e che non si raggiungano condizioni critiche in corrispondenza delle discontinuità del sistema (ovvero le faglie), sia sulle caratteristiche petrofisiche (in particolare, permeabilità e porosità) della roccia serbatoio.

Visage consente di considerare differenti livelli di interazione tra fenomeni geomeccanici e fluidodinamici, ovvero: analisi di tipo *iteratively coupling* o analisi di tipo *one-way coupling*. L'approccio *iteratively coupling* prevede la soluzione separata e sequenziale delle equazioni di modello: per ogni *time-step* di analisi si determina con Eclipse, tramite la soluzione delle equazioni di flusso, la caduta di pressione dovuta alla produzione; la distribuzione delle pressioni così calcolata viene usata in Visage per determinare, in funzione della legge costitutiva selezionata, il nuovo stato di tensione che si instaura negli ammassi rocciosi e per aggiornare i valori delle variabili di accoppiamento (ovvero permeabilità e/o porosità). Al *time-step* successivo, si esegue nuovamente l'analisi fluidodinamica con Eclipse utilizzando i valori aggiornati di permeabilità/porosità (fig. 10a). Secondo l'approccio *one-way coupling*, invece, ad ogni *time-step* selezionato si determina con Visage lo stato tenso-deformativo indotto nel sistema a seguito di una determinata variazione di pressione calcolata mediante Eclipse (fig. 10b). Anche se l'interazione tra l'aspetto tensionale e fluidodinamico sussiste, con differenti gradi di importanza, in ogni formazione mineralizzata, è generalmente riconosciuta la necessità di ricorrere ad un approccio complesso, quale quello di tipo *iteratively coupling*, solo laddove l'interconnessione tra l'aspetto geomeccanico e quello fluidodinamico risulti imprescindibile per riprodurre il comportamento del sistema e, quindi, parte essenziale del processo di *history match* (per esempio, nel caso di formazioni fortemente comprimibili).

3.2 Definizione del modello

3.2.1 Grid

Il grid utilizzato nello studio geomeccanico è quello ricavato dallo studio geologico e descritto al paragrafo 1.6.

3.2.2 Classificazione geomeccanica

Dal punto di vista del comportamento geomeccanico, il modello numerico comprende diverse litologie. Le litologie riscontrate sono state distinte in 22 differenti classi, identificate in funzione del litotipo e dei parametri geomeccanici e finalizzate alla descrizione del comportamento sforzi – deformazioni dell'ammasso roccioso.

Dal momento che tutti i terreni discretizzati sono granulari, si è assunto che il loro comportamento fosse, alla scala del modello, isotropo e omogeneo. Si è comunque tenuto conto della discontinuità del comportamento meccanico dovuto alla presenza delle faglie.

Nella tabella 1 sono riportati, per ogni formazione geologica, la classe geomeccanica associata e i corrispondenti *layers* numerici.

Sulla base di considerazioni litologiche derivanti dall'analisi dei profili 1:1000 dei pozzi ubicati all'interno dell'area modellizzata sono stati individuati due litotipi dominanti: argille e sabbie. I termini "argille" e "sabbie" si riferiscono a terreni che si trovano a profondità superiori a 1000 m e che quindi sono naturalmente soggetti a sforzi orizzontali (tensioni intermedie e minime) di ordine superiore ai 10 MPa. Per questo motivo la struttura di questi terreni ha caratteristiche più assimilabili a quella delle rocce che a quella dei terreni sciolti.

I depositi alluvionali superficiali sono descritti dalla prima classe geomeccanica.

Le Argille del Santerno e la formazione Carassai intermedia, discretizzate in dodici *layers*, sono state suddivise in otto differenti classi, che permettono di descrivere la compattazione crescente delle formazioni sabbioso-argillose e argillose in funzione della profondità. In particolare la classe 6 rappresenta la formazione Carassai, mentre la classe 9 rappresenta la *cap rock* del giacimento di Montepagano.

La formazione Teramo Membro Montepagano è caratterizzata da una alternanza di livelli sabbiosi mineralizzati a gas e di *interlayers* argillosi. In particolare, le classi 10, 12 e 14 rappresentano rispettivamente i livelli mineralizzati MP1z (livelli numerici 14, 15 e 16), MP1 (livelli numerici da 18 a 23) ed MP2 (livello numerico 25); l'*interlayer* tra MP1z ed MP1 è descritto dalla classe 11, mentre la classe 13 descrive il livello argilloso compreso tra il livello MP1 e MP2.

La parte sommitale della formazione Teramo, descritta dalla classe geomeccanica 15, è suddivisa in tre livelli numerici, dei quali l'ultimo (*layer* 28) rappresenta la *cap rock* della sottostante sequenza mineralizzata delle Alternanze.

I livelli numerici dal 29 al 68 descrivono l'alternanza di livelli sabbiosi mineralizzati a gas e di *interlayers* argillosi che definisce la sequenza mineralizzata delle Alternanze presente nella parte basale della formazione Teramo. In particolare, i livelli mineralizzati a gas sono caratterizzati dalla classe 16, mentre la classe 17 definisce i livelli argillosi intermedi in acqua.

Le formazioni basali del modello, fino ad una profondità di 6 km, sono definite dalle classi 18-22, che rappresentano formazioni sabbioso-argillose con un differente grado di compattazione in funzione della profondità.

Nella fig. 11 è riportata una rappresentazione schematica della sequenza stratigrafica tipo rinvenuta nell'area di interesse e riprodotta nel modello geomeccanico, con le relative classi geomeccaniche associate.

Ad ogni classe sono stati assegnati i parametri di deformabilità e di resistenza e la legge di comportamento sforzi – deformazioni. Il comportamento sforzi – deformazioni è di tipo elastico – perfettamente plastico.

Le proprietà assegnate ai terreni e alle rocce di ogni classe sono quindi:

- i. Proprietà pseudo - elastiche
- ii. Parametri di inizializzazione
- iii. Parametri di resistenza a taglio, assumendo come criterio di resistenza quello di Mohr-Coulomb

Per la fase elastica isotropa sono stati definiti i moduli di Young, i rapporti di Poisson e i coefficienti di Biot. I parametri di inizializzazione consentono di determinare lo stato tensionale della formazione indisturbata. Per l'applicazione del criterio di Mohr-Coulomb sono stati inoltre definiti la coesione e l'angolo d'attrito interno. I criteri adottati per definire le proprietà pseudo-plastiche e i parametri relativi al criterio di resistenza di Mohr-Coulomb sono illustrati nel seguito.

3.2.3 Caratterizzazione geomeccanica

3.2.3.1 Parametri di deformabilità dei mezzi porosi

Il comportamento sforzi-deformazioni dei terreni e delle rocce che costituiscono il giacimento e le rocce limitrofe è fortemente non lineare e dipendente sia dalla deformazione sia dalla plasticizzazione per sforzo deviatorico dei mezzi porosi.

Nella prima fase, a deformazioni molto piccole (millesimi di m/m), il modulo elastico del mezzo viene meglio stimato da prove geofisiche, mentre all'aumentare della deformazione (da poche unità di millesimi di m/m fino a ordini dell'unità del centesimo di m/m) il modulo elastico può essere determinato da prove meccaniche di laboratorio, quali la compressione uni assiale o triassiale consolidata, con misura delle deformazioni. In una terza fase, in cui si raggiunge la plasticizzazione del mezzo, il modulo elastico decresce sensibilmente fino a portarsi a valori pressoché nulli con deformazioni dell'ordine dei 2.5 – 3.5 centesimi di m/m. A questi livelli di deformazione i parametri di resistenza a taglio sono determinati da prove triassiali.

Per quanto riguarda i moduli elastici dinamici, ottenuti da prove geofisiche, e i moduli elastici statici, ottenuti da analisi di laboratorio, si è fatto riferimento alle prove svolte per la caratterizzazione fisico-meccanica delle Argille di Santerno presso il Laboratorio di Petrofisica del Dipartimento di Scienze della Terra 'Ardito Desio' dell'Università degli Studi di Milano nell'ambito delle tesi di laurea di Ambra Mauri (2010) e di Giulia Vigani (2011). Durante questi lavori di tesi sono stati esaminati spezzoni di carote, pressoché indisturbate, delle argilliti incassanti il giacimento di Sergnano (CR), recuperati alla

profondità di circa 1200 metri. I campioni sono stati oggetto di una caratterizzazione mineralogica e di prove per la determinazione dei limiti di Atterberg, effettuate successivamente alle prove geotecniche.

I campioni sono stati sottoposti a prove soniche per la determinazione delle velocità V_p e V_s (onde di compressione e di onde di taglio) in condizioni di pressione di confinamento isotropa (P_c) e a prove tradizionali di compressione uniassiale con la misura delle deformazioni assiali. Nelle prove soniche ogni campione è stato sottoposto a tre cicli di carico-scarico, con misura del tempo impiegato dalle onde ultrasoniche ad attraversare il provino di lunghezza nota. Durante le prove si sono misurate sia le deformazioni longitudinali sia quelle assiali, in modo da poter valutare, oltre ai moduli elastici dinamici, anche quelli statici. Un ciclo completo comprende una fase di carico, che parte da una pressione di 30 MPa (con gradini di carico successivi secondo incrementi di circa 20 MPa) fino ad una pressione di circa 290 MPa, e una fase di scarico. Durante le prove è stato possibile misurare le densità relative a seguito di ogni ciclo, al fine di valutare la relazione tra variazione di velocità e variazione del peso di volume indotta dai cicli carico-scarico.

Dalle misure di velocità ultrasoniche sono stati stimati i moduli elastici dinamici (E_d), mentre dalle deformazioni meccaniche sono stati valutati i moduli statici (E_s). La sperimentazione condotta ha dunque consentito di ricavare le equazioni di correlazione tra velocità e pressioni di confinamento, $V_p=f(P_c)$ e $V_s=f(P_c)$, la variazione di comportamento elastico ed il grado di anisotropia sonica e meccanica.

Attraverso le misure delle onde ultrasoniche longitudinali (onde P) e di taglio (onde S) sono stati determinati i corrispondenti valori dei Moduli Elastici Dinamici (E_d). Per questo scopo si è innanzi tutto proceduto determinando il Modulo di Taglio (G) a partire dalle \bar{V}_s e il Modulo di Compressibilità Volumetrica (K) a partire dalle \bar{V}_p , secondo le relazioni inverse:

$$G = \bar{V}_s^2 \rho \quad (1)$$

$$K = \bar{V}_p^2 - \frac{4}{3}G \quad (2)$$

dove ρ è la densità media dei campioni. Per il calcolo del Modulo di Taglio, G , si è preso il valore medio delle densità dei campioni calcolata geometricamente in laboratorio dopo l'esecuzione delle prove di propagazione delle onde S, mentre per il Modulo di Compressibilità Volumetrica, K , si è presa in considerazione la densità media dei campioni, sempre calcolata geometricamente per ciascuno di essi, dopo l'esecuzione delle prove di propagazione delle onde P.

Sapendo che :

$$\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 = \sqrt{\frac{1/2 - \nu}{1 + \nu}} \quad (3)$$

si è calcolato il valore del rapporto di Poisson (ν).

Infine è stato possibile determinare il Modulo Elastico Dinamico (E_d) in base all'equazione:

$$E_d = K[3(1 - 2\nu)] \quad (4)$$

I valori ottenuti per i moduli elastici dinamici passano dal valore minimo di 18 GPa alla pressione di confinamento di 30 MPa a quello massimo di 33 GPa alla pressione di confinamento di 280 MPa.

Il modulo elastico statico è stato ottenuto grazie alle misure delle deformazioni del campione effettuate durante le prove. Un esempio tipico di questa determinazione di laboratorio viene illustrato nella fig. 12, dove sono diagrammate le deformazioni $\varepsilon_{\text{long}}$ ed ε_{rad} misurate durante l'intero ciclo di carico - scarico. I moduli elastici dinamici determinati per le Argille di Santerno e per le arenarie del giacimento sottostante variano quindi tra i 18 GPa e i 33 GPa, con valori inferiori del 10% circa per le arenarie. I valori minimi dei moduli elastici dinamici sono stati ottenuti con pressioni di 30 MPa, mentre i valori massimi sono stati ottenuti con valori di pressione di 290 MPa.

Le prove hanno quindi confermato la dipendenza tra il modulo elastico e la pressione isotropa applicata al campione e, in particolare, come all'aumentare di tale pressione anche il modulo elastico aumenti.

Il modulo elastico statico può essere ottenuto, noti i valori isotropi delle deformazioni sugli assi x, y e z e il rapporto di Poisson, utilizzando l'equazione della legge costitutiva elastica:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (5)$$

dove:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z \quad (6)$$

ottenendo quindi:

$$E = \frac{\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)}{\varepsilon} \quad (7)$$

Il modulo elastico statico è stato pertanto determinato considerando pressioni di confinamento pari 30, 90, 130, 280 MPa; il rapporto di Poisson (ν) è stato assunto pari a 0.3. I valori ottenuti per i moduli elastici statici variano dal valore minimo di 2.33 GPa alla pressione di confinamento di 30 MPa al valore massimo di 4.99 GPa alla pressione di confinamento di 280 MPa. Questi risultati mettono in evidenza come i valori dei moduli elastici dinamici siano dalle 4 fino alle 6 volte maggiori di quelli dei moduli statici, confermando, anche se con rapporti tra moduli dinamici e statici leggermente maggiori, i dati che possono essere ricavati da una ricerca bibliografica.

La resistenza a compressione uniassiale delle argilliti ottenuta dalle prove svolte presso l'Università di Milano è dell'ordine dei 30 – 50 MPa.

Altri studi a carattere sia sperimentale sia teorico effettuati presso il Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate (DMMMSA) dell'Università di Padova hanno valutato la compressibilità delle *cap rock* e degli acquiferi salini profondi, definendo la relazione tra la tensione efficace verticale e la compressibilità verticale riportata nella fig. 13 (Teatini, 2011). La relazione di tipo lineare riportata nella fig. 14 esprime, in accordo con i dati proposti da Teatini, l'andamento del modulo elastico statico in funzione della profondità. Elaborando i risultati disponibili per i moduli dinamici è possibile ricavare una analoga relazione (fig. 14) che esprime l'andamento dei moduli elastici dinamici in funzione della profondità.

Il campo di esistenza del modulo elastico del mezzo poroso può essere definito in funzione della profondità del mezzo e del livello di deformazione indotta dalla produzione o dallo stoccaggio. La situazione iniziale, in cui le deformazioni massime sono dell'ordine delle unità di millesimi di m/m, è prevalentemente governata dai moduli elastici dinamici. Con l'aumentare delle deformazioni principali massime, i valori dei moduli elastici diminuiscono progressivamente, fino a raggiungere, a deformazioni dell'ordine del centesimo di m/m, quelli statici. Con un ulteriore aumento delle deformazioni principali massime, il comportamento del mezzo poroso diventa ancora più marcatamente non lineare fino al raggiungimento delle condizioni di plasticità, dove il valore del modulo elastico diventa trascurabile, se si assume un comportamento del mezzo elastico – perfettamente plastico, o pari a valori dell'ordine del decimo del modulo elastico statico iniziale, se si assume un comportamento incrudente.

Nel caso in esame, restando i valori delle deformazioni principali dell'ordine dei pochi millesimi di m/m, si è scelto di effettuare la modellizzazione numerica delle fasi di produzione e stoccaggio variando in modo parametrico i valori del modulo elastico. In particolare, tenendo conto del campo di esistenza dei moduli pseudo-elastici, la risposta del sistema è stata analizzata in relazione ai seguenti casi (fig. 15):

1. “caso statico”: moduli elastici pari a 2.5 volte i valori statici di riferimento;
2. “caso medio”: moduli elastici pari a 3.5 volte i valori statici di riferimento;
3. “caso dinamico”: moduli elastici dinamici, ovvero 4.5 volte maggiori dei valori statici di riferimento.

3.2.3.2 Parametri di resistenza dei mezzi porosi

La determinazione dei rapporti di Poisson, della coesione drenata e dell'angolo d'attrito di argille e sabbie è stata effettuata sulla base di esperienze pregresse relative alle stesse formazioni (Argille del Santerno) e da prove triassiali consolidate isotropicamente e non drenate effettuate dall'Università di Milano su analoghi terreni.

L'approccio utilizzato nella caratterizzazione di tali parametri è stato di tipo estremamente conservativo. In particolare dalle prove di rottura non drenata sono stati determinati i valori di coesione drenata e di angolo d'attrito.

Nella tab. 2 sono riportati i valori dei parametri di inizializzazione e dei parametri di resistenza relativi al criterio di Mohr-Coloumb adottati per popolare il modello.

3.2.4 Faglie

Ai fini dell'analisi geomeccanica condotta, le faglie interne al giacimento rappresentano un potenziale elemento di debolezza del sistema, mentre le faglie che concorrono a definire l'assetto strutturale del modello statico esteso non risentono di variazioni tensionali apprezzabili.

Nella fig. 16 sono mostrate le faglie di giacimento prese in considerazione nel corso dell'analisi meccanica. Nella tab. 3 sono riassunti i parametri geomeccanici che competono alle faglie, in particolare la rigidità normale e di taglio e i parametri di resistenza a taglio. In considerazione dei notevoli rigetti, al contatto tra le pareti delle faglie si è imposta una brusca riduzione della resistenza di tipo coesivo.

La rigidità di taglio è stata determinata simulando un fenomeno di scorrimento a grande scala, mentre la rigidità normale è stata assunta circa 2.5 volte maggiore della rigidità di taglio, in accordo con i dati reperiti da studi bibliografici (Roest et al., 1999).

3.3 Inizializzazione

Il modello popolato secondo i criteri definiti nei paragrafi precedenti permette di calcolare il campo tensionale originale in funzione della profondità e della tipologia della formazione. Il campo delle pressioni originali è stato definito in funzione dei valori misurati in corrispondenza della sequenza Montepagano e della sequenza Alternanze al momento della scoperta.

La pressione originale della formazione Montepagano era pari a 297.04 Barsa alla profondità (*datum depth*) di 2456 m TVD ss, mentre quella della formazione Alternanze era pari a 484.2 Barsa alla profondità (*datum depth*) di 2965 m TVD ss. La sequenza delle Alternanze risulta quindi sottoposta ad un regime di sovrappressione, mentre i livelli mineralizzati di Montepagano sono soggetti ad un regime di pressione idrostatico. Sulla base di questi dati, tutte le celle del modello mineralizzate ad acqua comprese tra il piano campagna e la formazione al bottom del giacimento di Montepagano sono state popolate con valori di pressione calcolati secondo un gradiente idrostatico pari a 0.116 bar/m. Le pressioni che competono alle celle della porzione basale non mineralizzata del modello, a partire dal *top* della sequenza delle Alternanze, sono state calcolate utilizzando un gradiente di pressione pari a 0.155 bar/m. Infine, le pressioni delle celle nei livelli mineralizzati delle formazioni Montepagano e Alternanze sono state calcolate secondo il gradiente del gas, definito sulla base della Gas Gravity e delle curve di B_g del gas

prodotto, in base alle rispettive profondità dei contatti gas-acqua originali e ai rispettivi valori di pressione iniziale.

3.4 Analisi dell'evoluzione del campo tenso-deformativo

3.4.1 Principi di analisi

L'analisi delle variazioni del campo tensionale e deformativo indotte dalle operazioni di produzione e di stoccaggio della formazione Montepagano e dalla produzione primaria della formazione Alternanze è stata effettuata avvalendosi dell'approccio geomeccanico-fluidodinamico di tipo *one-way coupling*. Questa metodologia di analisi consente di studiare il comportamento geomeccanico delle formazioni profonde in base all'evoluzione delle pressioni nel tempo.

Secondo l'approccio *one-way coupling*, ad ogni *time-step* di analisi viene calcolata la distribuzione delle pressioni interstiziali indotte dalla produzione ovvero dall'iniezione di gas in giacimento nella formazione mineralizzata e nell'acquifero circostante. La pressione nella formazione indisturbata resta costante ed uguale al valore iniziale. Sulla base della variazione delle pressioni rispetto al passo temporale precedente si determina la corrispondente variazione dello stato tenso-deformativo del sistema mediante simulazione geomeccanica. Sulla base del nuovo equilibrio geomeccanico raggiunto, per ogni *time-step* di analisi, vengono quindi verificate le condizioni di sicurezza del sistema in termini di resistenza meccanica agli sforzi di taglio e di trazione e vengono calcolate le deformazioni e quindi gli spostamenti delle rocce in profondità, nonché come tali deformazioni si propagano in superficie.

3.4.2 Analisi effettuate

Lo studio geomeccanico è stato effettuato considerando una legge costitutiva di tipo elasto-plastico al fine di evidenziare eventuali fenomeni di plasticizzazione.

Poiché l'analisi è condotta in campo tridimensionale, la funzione di plasticità è definita sui tre assi degli sforzi principali ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). La funzione di plasticità, definita dal criterio di Mohr-Coulomb, è identificata dalla superficie di una piramide a base esaedrica, che ha come asse la retta $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$. In corrispondenza del punto $\sigma_2=\sigma_3=0$, σ_1 è il valore della resistenza a compressione uniassiale assegnata alla massa rocciosa. Allo stesso modo σ_2 , in corrispondenza del punto $\sigma_1=\sigma_3=0$, e σ_3 , in corrispondenza del punto $\sigma_1=\sigma_2=0$, assumono il valore della resistenza a compressione monoassiale. L'inclinazione dei sei spigoli della superficie è pari a:

$$\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (8)$$

dove φ è l'angolo di attrito.

La seguente formula esprime la relazione, nel criterio di Mohr-Coulomb, tra la resistenza a compressione semplice, σ_c la coesione, c , e l'angolo d'attrito, φ :

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (9)$$

Gli stati tensionali elastici si trovano all'interno del solido, mentre i punti che si trovano sulla sua superficie rappresentano una condizione di plasticità (fig. 17). Dal momento che il modello costitutivo scelto è elastico - perfettamente plastico, non si ha né incrudimento né rammollimento, per cui tutti gli stati tensionali rappresentati da punti che si trovano al di fuori di detto solido sono non compatibili con l'equilibrio del sistema.

Per verificare la condizione di stabilità dello stato tensionale in un punto, si determina la minima distanza dalla superficie di plasticità, denominata *failure*. Per ogni analisi è possibile rappresentare, per ogni elemento o cella del sistema, il valore della corrispondente *failure*: valori negativi di *failure* denotano un comportamento stabile, mentre valori prossimi allo zero segnalano una possibile evoluzione verso la plasticizzazione (Fjær et al., 2008).

Poiché eventuali condizioni di *failure* si manifesterebbero in corrispondenza delle massime variazioni di pressione, è stata valutata la risposta del modello nelle seguenti condizioni:

- al termine della fase di produzione primaria (dati aggiornati a marzo 2010) sia nella formazione Montepagano sia nella formazione Alternanze: questa situazione rappresenta una condizione di elevata sollecitazione del sistema in quanto si è raggiunta la minima pressione di giacimento;
- al termine della futura fase di ricostituzione della formazione Montepagano alla pressione di scoperta;
- in corrispondenza di un ciclo di iniezione a pressione pari alla pressione iniziale e di un ciclo di produzione ipotizzando il raggiungimento di una pressione minima di testa pozzo (THP_{min}) pari a 75 barsa durante future operazioni di stoccaggio nelle formazioni Montepagano.

In concomitanza con le operazioni di stoccaggio nelle formazioni Montepagano, la distribuzione delle pressioni nella sottostante formazione Alternanze viene mantenuta costante nel tempo e pari a quella ottenuta a fine produzione primaria.

Va tenuto presente che la produzione del gas determina un aumento delle tensioni efficaci nelle stesse formazioni da cui avviene la produzione. Conseguentemente, dal punto di vista della stabilità, la produzione induce stati tensionali ancora più lontani dalla superficie di plasticizzazione rispetto alle condizioni iniziali, con un aumento in valore assoluto dei valori di *failure* (che in condizioni di elasticità sono negativi). Corrispondentemente, la produzione determina degli spostamenti verticali verso il basso della *cap rock* e un abbassamento, poco apprezzabile, della superficie del piano di campagna.

Le condizioni potenzialmente più critiche, per quanto riguarda la stabilità, si realizzerebbero in fase di iniezione se venisse aumentata la pressione del gas fino a valori superiori a quelli iniziali, in quanto si avrebbe una diminuzione delle tensioni efficaci, con una conseguente diminuzione, in termini assoluti, dei valori di *failure* rispetto alle condizioni originarie. In base ai valori della coesione e dell'angolo d'attrito delle formazioni produttive, la plasticità può essere indotta solo per valori di tensioni efficaci estremamente basse.

In fase di re-iniezione del gas, quando viene sostanzialmente ripristinato lo stato iniziale, anche le tensioni efficaci diminuiscono fino a raggiungere i valori precedenti la coltivazione. Tuttavia, a causa della presenza dell'acquifero che delimita il giacimento e il cui equilibrio iniziale viene modificato a seguito della produzione primaria, e poiché il ripristino delle condizioni iniziali non può essere effettuato puntualmente, ma varia a seconda del numero e posizione di pozzi utilizzati, la modellizzazione numerica 3D diventa fondamentale per controllare che non si verifichino fenomeni di plasticizzazione locali. Inoltre, essa è anche necessaria per analizzare l'evoluzione dello stato tensionale delle faglie, elementi di potenziale criticità del sistema.

Poiché, come già accennato, il comportamento sforzi – deformazioni delle rocce è marcatamente non lineare, anche in fase elastica, è stata svolta un'analisi di sensitività mirata a definire l'effetto, in termini di subsidenza, della variazione dei moduli pseudo-elastici dell'intero sistema. In particolare, sono state analizzate tre casi, che differiscono sostanzialmente nella definizione dei moduli elastici (vedasi par. 4.2.3.1):

- caso statico: moduli elastici circa pari a 2.5 volte i valori statici di riferimento
- caso medio: moduli elastici circa pari a 3.5 volte i valori statici di riferimento
- caso dinamico: moduli elastici circa pari a 4.5 volte i valori statici di riferimento e quindi pari ai valori definiti per i moduli elastici dinamici.

Per quanto riguarda l'analisi dell'evoluzione del campo tensionale e del corrispondente stato di *failure*, i tre casi sopracitati sono sostanzialmente equivalenti. Viceversa, le deformazioni e gli spostamenti dipendono dalle costanti elastiche.

Sulla base di tali considerazioni, di seguito vengono riportati i risultati relativi all'evoluzione del campo tensionale e del corrispondente stato di *failure* per il solo "caso statico".

3.5 Evoluzione del campo tensionale nel "caso statico"

3.5.1 Time steps di analisi

Nelle figg. 18 e 19 sono riportate le distribuzioni delle pressioni al top della formazione Montepagano rispettivamente alla scoperta, al termine della produzione primaria, alla fine

della ricostituzione e, in fase di stoccaggio, al termine di un ciclo di produzione ($THP_{min}=75$ barsa) e al termine di un ciclo di iniezione a $p=p_i$.

Nella fig. 20 sono riportate le distribuzioni delle pressioni al top della formazione Alternanze (livello SB4) rispettivamente alla scoperta e al termine della produzione primaria.

Le distribuzioni delle pressioni tengono conto della propagazione del disturbo indotto dalle operazioni di coltivazione e/o di stoccaggio nei livelli mineralizzati e negli eventuali acquiferi circostanti.

3.5.2 Produzione primaria – F.ne Montepagano

A seguito della fase di produzione primaria la formazione Montepagano ha raggiunto una pressione media pari a circa 90 barsa alla profondità (*datum*) di 2456 m TVD ss.

Le figg. 21 e 22 riportano, sulla sezione posta al top della f.ne Montepagano, le curve di ugual livello delle tensioni σ'_{yy} , σ'_{xx} e σ'_{zz} rispettivamente in condizioni indisturbate e alla fine della produzione primaria. Dal punto di vista dell'evoluzione dello stato tensionale del giacimento, la diminuzione della pressione dei fluidi contenuti nella roccia ha determinato un aumento medio, alla scala del giacimento delle tre componenti delle tensioni efficaci, compreso tra 100 e 212 bar. Il giacimento è limitato sia a nord-ovest sia a nord-est da due faglie (rispettivamente “faglia ovest” e “faglia mediana”), che si incontrano formando un angolo acuto e che costituiscono una barriera al flusso. In direzione sud-ovest, il giacimento è confinato dall'acquifero laterale dal quale, a seguito della produzione, si genera un flusso di acqua verso la zona mineralizzata. La variazione delle tensioni efficaci a seguito della produzione non è quindi costante nel giacimento, ma è maggiore in corrispondenza della zona dove le faglie si incontrano (fig. 23). Nelle zone esterne al giacimento non si hanno sensibili variazioni delle tensioni efficaci.

Dal momento che lo sforzo deviatorico rimane pressoché costante con l'aumentare delle pressioni efficaci si raggiungono stati tensionali che, rappresentati nello spazio cartesiano di σ_1 , σ_2 , σ_3 , sono ancora più distanti dalla superficie di plasticizzazione. Inoltre, si può evidenziare che, dal momento che lo stato tensionale è semplicemente gravitativo, con un rapporto tra la tensione intermedia e quella massima (verticale) pari 0.8 e tra la tensione principale minima (orizzontale) e quella massima pari a 0.9, e che le sollecitazioni applicate al modello sono conseguenti a sforzi verticali, diretti verso il basso, le tensioni principali massime, minime e intermedie hanno, a parte le zone di contatto con le faglie, direzione praticamente uguali a y, z e x.

Le figg. 24 e 25 riportano le curve di ugual valore delle tensioni principali efficaci in una sezione orizzontale della *cap rock*, rispettivamente in condizioni indisturbate e al termine della produzione primaria. Come si evince dalla fig. 26, nella zona direttamente sovrastante il giacimento gli sforzi efficaci rimangono pressoché costanti, mentre nella zona della faglie si ha una debole concentrazione delle tensioni efficaci dovuta al fatto che le faglie rappresentano zone di debolezza.

Le figg. 27 e 28 riportano l'evoluzione, a seguito della produzione primaria, delle curve di ugual valore della funzione *failure* rispettivamente al top della f.ne Montepagano e nella *cap rock*. La *failure* rappresenta in ogni punto la distanza tra lo stato di tensione limite (punto di coordinate σ_1 , σ_2 e σ_3) sulla superficie di plasticizzazione e quello esistente al termine della fase di produzione. La produzione induce una maggior stabilizzazione nella zona del giacimento in cui la produzione ha indotto una riduzione delle pressioni, mentre i valori di *failure* diminuiscono, in valore assoluto, subito alle spalle delle faglie che delimitano il giacimento. Del tutto analoga risulta l'evoluzione dello stato di *failure* nella *cap rock*. In particolare, i valori minimi di *failure* nella *cap rock* e al top del giacimento sono, rispettivamente, -3967 e -6803. Tuttavia, poiché i valori calcolati risultano sempre ampiamente negativi, è evidente come per gli stati di tensione esistenti sussistano sempre condizioni di sicurezza, ovvero di fattori di sicurezza (rapporti tra tensioni resistenti massime mobilitabili ed esistenti) puntuali ampiamente maggiori dell'unità.

La faglia ovest e quella mediana rappresentano due barriere di flusso che delimitano il giacimento e, come tali, risultano gli elementi "faglia" sottoposti alle maggiori sollecitazioni indotte dalle differenze di pressione tra la formazione indisturbata e la formazione mineralizzata. Nelle figg. 29 e 30 viene rappresentata la *failure* relativa alle faglie per sforzo di taglio, rispettivamente, al top della f.ne Montepagano e nella *cap rock*. Si può notare come in giacimento si verifichi una diminuzione delle condizioni di stabilità solo in alcune porzioni della faglia mediana (valore minimo di *failure*: -6622), mentre la faglia ovest si sposta sostanzialmente verso condizioni di maggior stabilità. La faglia mediana mostra un comportamento analogo anche nella *cap rock* (valore minimo di *failure*: -4848), mentre le condizioni della faglia ovest restano praticamente inalterate. Anche in questo caso, i valori di *failure* si mantengono sempre negativi e fortemente lontani dalle condizioni di rottura.

3.5.3 Ricostituzione iniziale a $p=p_i$ - F.ne Montepagano

Le figg. 31 e 32 riportano le curve di ugual valore delle tensioni efficaci lungo gli assi y, x e z ottenute al termine della ricostituzione rispettivamente al top del giacimento e nella *cap rock*. Poiché il comportamento del sistema è puramente elastico, in linea di massima vengono ripristinate le condizioni originali del sistema. Tuttavia, fa eccezione l'acquifero laterale che risulta marginalmente interessato dall'aumento delle pressioni dovute all'iniezione del gas. In questa porzione del sistema le pressioni si mantengono più basse rispetto a quelle iniziali e, di conseguenza le tensioni efficaci verticali sono maggiori di circa 40/50 bar, quelle orizzontali di circa 20/30 bar.

L'aumento delle pressioni interstiziali dovute all'iniezione del gas in giacimento provoca una diminuzione delle tensioni efficaci con conseguente diminuzione, in termini assoluti, dei valori di *failure* rispetto alla produzione primaria (valore minimo di *failure*: -8443). Inoltre, diminuendo la differenza di pressione tra la zona mineralizzata e la formazione indisturbata, si assiste ad una progressiva stabilizzazione delle faglie. Vengono sostanzialmente ripristinate le condizioni iniziali (fig. 33). Localmente, nelle zone di

giacimento in cui le pressioni interstiziali aumentano maggiormente perché più vicine ai pozzi di iniezione, si possono avere condizioni di *failure* più severe. Tuttavia, anche in queste zone le condizioni di sicurezza sono ampiamente soddisfatte.

L'iniezione di gas in giacimento determina, nella zona della *cap rock* (fig. 34), il ripristino delle condizioni iniziali, a meno della zona sovrastante l'acquifero, in cui vengono parzialmente conservate condizioni di maggior stabilità raggiunte durante la produzione primaria, analogamente a quanto avviene in giacimento.

Analoghe osservazioni valgono anche per lo stato di *failure* per taglio nelle faglie: le figg. 35 e 36 mostrano come, al termine della fase di ricostituzione, vengano ristabilite le condizioni iniziali.

3.5.4 Ciclo ordinario di stoccaggio - F.ne Montepagano

Dal punto di vista dello stato tensionale, le condizioni raggiunte in fase di iniezione a $p=p_i$ e di svasso ($THP_{min}=75$ barsa) non rappresentano situazioni critiche né per la stabilità globale di strutture come la *cap rock* o le faglie né per la stabilità locale. Infatti, sia al termine della ricostituzione sia alla fine della produzione primaria (ad una pressione di circa 90 barsa), ovvero nelle condizioni di maggiore sollecitazione, il sistema si è dimostrato lontano da possibili condizioni di *failure*.

Al termine del ciclo di svasso si verifica un aumento degli sforzi efficaci nel giacimento, con un valore massimo di circa 140 bar per quanto riguarda la tensione verticale efficace in concomitanza del culmine della struttura. In questa zona, infatti, potenzialmente ottimale per collocare i pozzi di stoccaggio, si verifica la massima diminuzione di pressione interstiziali (circa 140 barsa) (fig. 37). Lo stato tensionale della *cap rock* subisce variazioni trascurabili rispetto alle condizioni raggiunte al termine della fase di ricostituzione del campo (fig. 38).

La situazione delineata per descrivere l'evoluzione del campo tensionale si ripropone, ovviamente, anche per lo stato di *failure*. A seguito della produzione, il giacimento e la *cap rock* sovrastante tendono a condizioni di maggior stabilità rispetto allo scenario della ricostituzione, mentre, come si era già riscontrato al termine della produzione primaria, i valori di *failure* aumentano alle spalle della faglia centrale che delimitano il giacimento (fig. 39). In particolare, la *failure* minima nella *cap rock* è di circa -5021, al top del giacimento di circa -7854.

Situazione del tutto analoga si riscontra nella fig. 40, che mostra lo stato di *failure* per taglio nelle faglie rispettivamente al top della f.ne Montepagano e nella *cap rock*: i valori minimi di *failure* si verificano in alcune porzioni della faglia mediana e si attestano intorno a valori di -6223 nella *cap rock* e -7721 al top del giacimento.

Poiché il comportamento del sistema è di tipo elastico, al termine del ciclo di iniezione a $p=p_i$ vengono sostanzialmente ripristinate le condizioni, in termini di campo tensionale e

di andamento delle *failure*, ottenute al termine della fase di ricostituzione, come mostrato nelle figg. 41, 42, 43 e 44.

3.5.5 Produzione primaria – F.ne Alternanze

A seguito della fase di produzione primaria le pressioni raggiunte nella f.ne Alternanze variano sensibilmente nei vari livelli, e si attestano nell'intervallo compreso tra 160 e 360 barsa alla profondità (*datum*) di 2965 m TVD ss .

A titolo di esempio, le figg. 45 e 46 mostrano le curve di ugual livello delle tensioni σ'_{yy} , σ'_{xx} e σ'_{zz} in condizioni indisturbate e al termine della produzione primaria per il primo livello prodotto della sequenza (livello SB4). La diminuzione della pressione di circa 300 barsa a seguito della produzione primaria ha determinato un aumento delle tensioni efficaci verticali in giacimento di circa 300 bar (fig. 47).

La *cap rock* della f.ne Alternanze è separata dal primo livello produttivo SB4 da cinque livelli, di cui tre mineralizzati a gas ma mai prodotti e da due setti argillosi. Le figg. 48 e 49, riferite alla *cap rock*, mostrano le curve di ugual livello delle tensioni σ'_{yy} , σ'_{xx} e σ'_{zz} in condizioni indisturbate e al termine della produzione primaria, rispettivamente. Il disturbo indotto dalla coltivazione dei livelli mineralizzati delle Alternanze non ha effetti rilevanti nella *cap rock* (fig. 50).

La faglia ovest e la faglia sub orizzontale chiamata “Alternanze” rappresentano due barriere di flusso che delimitano il giacimento e, come tali, risultano gli elementi sottoposti alle maggiori sollecitazioni indotte dalle differenze di pressione tra la formazione indisturbata e la formazione mineralizzata. Le figg. 51 e 52 rappresentano evoluzione dello stato di *failure* per taglio nelle faglie a seguito della produzione rispettivamente nel livello SB4 e nella *cap rock* della f.ne Alternanze. Si può notare come, a seguito della produzione, entrambe le faglie raggiungano condizioni di maggior stabilità in corrispondenza del livello di giacimento SB4, mentre la condizione di *failure* nella *cap rock* resta praticamente invariata.

3.6 Subsidenza

L'effetto principale della produzione primaria, che provoca un aumento delle tensioni efficaci nella zona di produzione, è quello di indurre spostamenti verticali diretti verso il basso. Questi spostamenti sono massimi al contatto tra il giacimento e la *cap rock* e vanno via via riducendosi nel propagarsi verso la superficie, fino ad raggiungere un valore minimo sul piano campagna (fenomeno della subsidenza). Durante le attività di stoccaggio la fase di ricostituzione induce il recupero della subsidenza iniziale, mentre i cicli di iniezione e di svaso generano limitate variazioni altimetriche periodiche del piano campagna.

Dall'analisi dei tre differenti casi studiati è possibile definire un *range* della subsidenza indotta dalla produzione primaria sia della f.ne Montepagano sia della f.ne Alternanze, nonché un intervallo di variazione dei movimenti relativi provocati sul piano campagna dalle operazioni di stoccaggio nella f.ne Montepagano.

In relazione al “caso statico”, la fig. 53 riporta l'andamento delle deformazioni verticali nella *cap rock* e nel giacimento al termine della produzione primaria per le f.ne Montepagano, mentre la fig. 54 riporta l'andamento delle deformazioni verticali nella *cap rock* e nel livello SB4, sempre al termine della produzione primaria, per la f.ne Alternanze. Come si evince da queste figure, le deformazioni massime sono dell'ordine del millesimo di m/m. A questo stato di deformazione corrispondono moduli elastici dell'ordine di grandezza corrispondente a quelli ottenuti da misure geofisiche, ovvero moduli elastici dinamici. Quindi, il “caso statico” analizza l'ipotesi più conservativa, in cui, pur con deformazioni massime dell'ordine delle unità di millesimi di m/m, si assumono moduli elastici relativamente bassi e paragonabili a quelli statici.

Le figg. 55 e 56 mostrano gli spostamenti verticali indotti al top della f.ne Montepagano e nel livello SB4 della f.ne Alternanze al termine della produzione primaria. Il cono di subsidenza che ne deriva (fig. 57) mostra un valore massimo di circa 4 cm e risulta spostato in direzione sud-ovest, ovvero nella direzione in cui si estende l'acquifero laterale che delimita la mineralizzazione nella f.ne Montepagano. Tuttavia, in corrispondenza dell'acquifero la subsidenza risulta estremamente limitata.

Le variazioni altimetriche massime del piano campagna durante i cicli di stoccaggio (per una THP_{min} pari a 75 barsa) sono di circa 1.2 cm nel caso di ricostituzione stagionale a pressione iniziale. Il cono di subsidenza relativo è più centrato rispetto al culmine di stoccaggio della f.ne Montepagano (fig. 58), poiché la variazione di pressione indotta dalle operazioni di stoccaggio interessano in modo trascurabile l'acquifero, che quindi mantiene una pressione pressoché inalterata.

In relazione al “caso medio”, le figg. 59 e 60 mostrano gli spostamenti verticali indotti al top della f.ne Montepagano e nel livello SB4 della f.ne Alternanze. Il cono di subsidenza relativo (fig. 61) mostra un valore massimo di circa 2.8 cm, spostato nella direzione sud-ovest in cui si estende l'acquifero della f.ne Montepagano.

La variazione altimetrica massima provocata dai cicli di stoccaggio (per una $THP_{min}=75$ barsa e iniezione a $p=p_i$) si ottiene in concomitanza del culmine della f.ne Montepagano ed è di circa 0.9 cm. Il cono di subsidenza è, anche in questo caso, centrale rispetto al culmine di stoccaggio (fig. 62).

Il “caso dinamico” ipotizza moduli elastici elevati, paragonabili a quelli dinamici, che meglio descrivono il comportamento della roccia nel caso di deformazioni massime dell'ordine delle unità di millesimi di m/m. Le figg. 63 e 64 mostrano gli spostamenti verticali indotti al top della f.ne Montepagano e nel livello SB4 della f.ne Alternanze. Il cono di subsidenza relativo (fig. 65) mostra un valore massimo di circa 2.2 cm e risulta allungato nella direzione sud-ovest in cui si estende l'acquifero della f.ne Montepagano.

La variazione altimetrica massima provocata dai cicli di stoccaggio (per una $THP_{min}=75$ bars e iniezione a $p=p_i$) si ottiene in concomitanza del culmine della f.ne Montapagano ed è di circa 0.7 cm. La forma del cono di subsidenza, anche in questo caso, non risente più dell'effetto dell'acquifero poiché il suo campo di pressioni resta pressoché inalterato durante le operazioni di stoccaggio (fig. 66).

3.7 Considerazioni generali

Per quanto riguarda le deformazioni, il “caso statico” evidenzia come esse si mantengano, in tutte le condizioni analizzate, uguali o minori al millesimo di m/m. In tali condizioni il comportamento dell'ammasso roccioso è descritto in modo appropriato da parametri elastici di tipo dinamico. Va da sé, quindi, che i risultati ottenuti in termini di spostamenti, ovvero di subsidenza, dall'analisi del “caso medio” e ancor più del “caso statico” siano da ritenersi conservativi rispetto alla reale risposta del sistema. I valori più plausibili sono quelli forniti dal “caso dinamico”.

In relazione alla subsidenza indotta, si rileva come l'Eurocodice (1997, 1996) indichi come valore ammissibile di rotazione relativa delle strutture 1/300; lo stesso valore ovvero valori compresi tra 1/500 e 1/150 sono riportati, anche in base all'osservazione di edifici esistenti, su numerosi articoli di riferimento della letteratura scientifica del settore geotecnico (Lancellotta, 2004). Altri lavori indicano i cedimenti differenziali massimi ammissibili in 20 – 60 mm, in funzione della tipologia delle fondazioni e della natura dei terreni. È evidente, quindi, che gli spostamenti del piano campagna indotti dalle attività di stoccaggio potrebbero indurre rotazioni relative o cedimenti differenziali delle strutture largamente inferiori ai valori limiti accettabili.

In relazione alla risposta del sistema in termini di campo tensionale e quindi di *failure*, i tre casi analizzati si discostano di poco da quello presentato (“caso statico”). I parametri di resistenza scelti per caratterizzare il sistema sono stati definiti in modo molto cautelativo sulla base di esperienza pregresse su formazioni simili e su dati disponibili in letteratura. I valori di *failure* sempre negativi e notevolmente distanti dai valori di rottura e la permanenza di alti valori della tensione orizzontale nella *cap rock* in ognuna delle condizioni analizzate per l'intero sistema sono indicativi dell'assenza di fessurazioni e rotture nelle due formazioni mineralizzate e nelle rocce incassanti, sia in corrispondenza dei massimi valori di produzione sia durante i cicli di stoccaggio a pressione uguale alla pressione iniziale.

Infine, l'effetto delle faglie del giacimento di Montepagano può essere riassunto nelle seguenti considerazioni:

- la faglie rappresentano elementi di debolezza all'interno del mezzo discretizzato;
- gli spostamenti di taglio tra due pareti di faglia sono quindi, a parità di carico, superiori a quelli verticali degli elementi del mezzo poroso;



- le due faglie che delimitano, dal punto di visto geometrico e di flusso, il giacimento fanno sì che, globalmente, gli spostamenti delle rocce che si trovano in prossimità delle faglie stesse abbiano una componente prevalentemente rigida dovuta alla traslazione (verso il basso in fase di produzione e verso l'alto in fase di ripristino) delle pareti di faglia e una componente variabile che dipende dal modulo elastico delle rocce stesse;
- in corrispondenza dei pozzi di iniezione, lontani dalle faglie, gli effetti degli spostamenti rigidi delle faglie sono trascurabili.

4. TENUTA IDRAULICA DELLA COPERTURA

Le Argille del Santerno, che rappresentano la copertura della formazione Montepagano, hanno uno spessore complessivo di circa 500 m, se pure interrotte da intercalazioni leggermente sabbiose. Le Argille del Santerno, riconoscibili a scala regionale, costituiscono la copertura di numerosi giacimenti a gas rinvenuti nella pianura padana e sono note per la loro sostanziale omogeneità e per le loro caratteristiche di bassissima permeabilità.

Visto che non si prevede il superamento della pressione iniziale durante le attività di stoccaggio, va da sé che la copertura sarà in grado di garantire la tenuta idraulica del gas presente nel giacimento. Non vi è infatti alcun motivo per cui la tenuta idraulica potrebbe essersi modificata nel breve tempo, se riferito alla scala geologica in cui il gas è rimasto confinato nel giacimento prima della scoperta, intercorso tra l'inizio della produzione e la conversione allo stoccaggio. D'altro canto, i cicli di invaso e svaso del gas non hanno alcun impatto di rilievo sulle caratteristiche della copertura.

5. BIBLIOGRAFIA

- Agip S.p.A., "Bollettino N. 1322/85 CIFL (Gas) – Campione di gas del pozzo S. BENEDETTO 5", Ingegneria del Petrolio – Laboratori Chimico-Fisica, 1985.
- Eurocodice 6 (1996). Progettazione delle strutture in muratura: Regole generali per strutture di muratura armata e non armata, UNI EN 1996-1-1:2006 Parte 1-1.
- Eurocodice 7 (1997). Progettazione geotecnica: Regole generali, UNI EN 1997-1:2005 Parte 1.
- Fjaer, P., Raaen A. M., Horsrud E., Risnes R., Holt R.M. (2008). Petroleum Related Rock Mechanics. Elsevier (2nd Edition), ISDN 978-0-444-50260-5.
- Gas Plus Storage SRL, "Concessione 'San Benedetto del Tronto' - Campo di San Benedetto - Studio di Giacimento sulla possibilità di adibire a stoccaggio il livello MP1-MP1z" – Relazione STOC SB/SIM/GPI, Rev. 001/07 – Luglio 2007.
- Lancellotta R. (2004). Geotecnica, III edizione Zanichelli
- Mancuso M., Pagliari F., Beretta E., "Pozzo: SAN BENEDETTO 5 DIR – Analisi delle prove", Relazione tecnica ENI – GISA, 1986.
- Mauri A. (2010) e Vigani G. (2011) "Caratterizzazione fisico – meccanica delle argille di Santerno, tetto del giacimento petrolifero di Sergnano (CR)". Università di Milano.
- Roest J.P.A., Mulders F.M.M., Kuilman W. (1999). "Data-limited geomechanical modelling for investigating induced seismicity mechanisms", Delft University of Technology, Delft, Netherlands. ISRM-Congress, Paris, August 1999.
- Schlumberger - Geoquest, "ECLIPSE Technical Description", 2006.
- Schlumberger - Geoquest, "ECLIPSE Reference Manual", 2006.
- Schlumberger, "VISAGE User's Guide", 2009.
- Teatini P., Castelletto N., Ferronato M., Gambolati G., Janna C., Cairo E., Marzorati D., Colombo D., Ferretti A., Bagliani A., Bottazzi F.(2011). "Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy", Journal of Geophysical Research, VOL. 116, F02002. Doi: 10.1029/2010JF001793.



TABELLE



Tabella 1 – Layers di modello e classi geomeccaniche per ogni formazione geologica

FORMAZIONE	LAYERS di MODELLO	CLASSE GEOMECCANICA	LIVELLI MINERALIZZATI
Alluvioni	1	1	
Argille del Santerno	2	2	
	3	3	
	4 a 5	4	
	6 a 7	5	
	8	6	
F.ne Carassai	9 a 10	7	
Argille del Santerno	11 a 12	8	
	13	9	
	14 a 16	10	MP1z
F.ne Teramo membro Montepagano	17	11	
	18 a 23	12	MP1
	24	13	
	25	14	MP2
	26 a 28	15	
F.ne Teramo	29,31,33,35,37,39,41,43,45,47,49, 51,53,55,57,59,61,62	16	Alternanze
	30,32,34,36,38,40,42,44,46,48,50, 52,54,56,58,60,63 a 68	17	
	69 a 70	18	
Livelli Basali	71	19	
	72	20	
	73	21	
	74	22	



Tabella 2 – Definizione dei parametri geomeccanici per le classi geomeccaniche di riferimento

CLASSI GEOMECCANICHE	PARAMETRI DI INIZIALIZZAZIONE					MOHR-COLOUMB			
	Gradiente Litostatico [bar/m]	Coeff. Stress orizzontale max** [-]	Coeff. Stress orizzontale min*** [-]	Azimuth stress orizzontale [°]	Inclinazione stress verticale [°]	Coesione [bar]	Angolo Attrito [°]	Angolo Dilatanza [°]	Tensile Stress Cut off [bar]
1	0.19	0.9	0.8	14	90	4	38	0	1
2	0.18					6	30		
3	0.19					6	30		
4	0.21					8	30		
5	0.21					12	30		
6	0.22					18	30		
7	0.22					16	30		
8	0.22					18	30		
9	0.22					20	30		
10*	0.23					14	38		
11	0.22					20	30		
12*	0.23					14	38		
13	0.22					20	30		
14*	0.23					14	38		
15	0.23					22	38		
16*	0.235					16	38		
17	0.235					24	30		
18	0.24					25	38		
19	0.245					26	38		
20	0.245					26	38		
21	0.25					27	38		
22	0.25					28	38		

(*) classi che corrispondono ai livelli mineralizzati

(**) rapporto tra stress efficace orizzontale massimo e stress efficace verticale

(***) rapporto tra stress efficace orizzontale minimo e stress efficace verticale



Tabella 3 – Parametri geomeccanici utilizzati per la caratterizzazione delle faglie

Rigidezza normale [bar/m]	Rigidezza al taglio [bar/m]	Coesione [bar]	Angolo di Attrito [°]	Angolo di Dilatanza [°]
30000	12000	6	30	10



FIGURE



Figura 1 – Ubicazione del campo

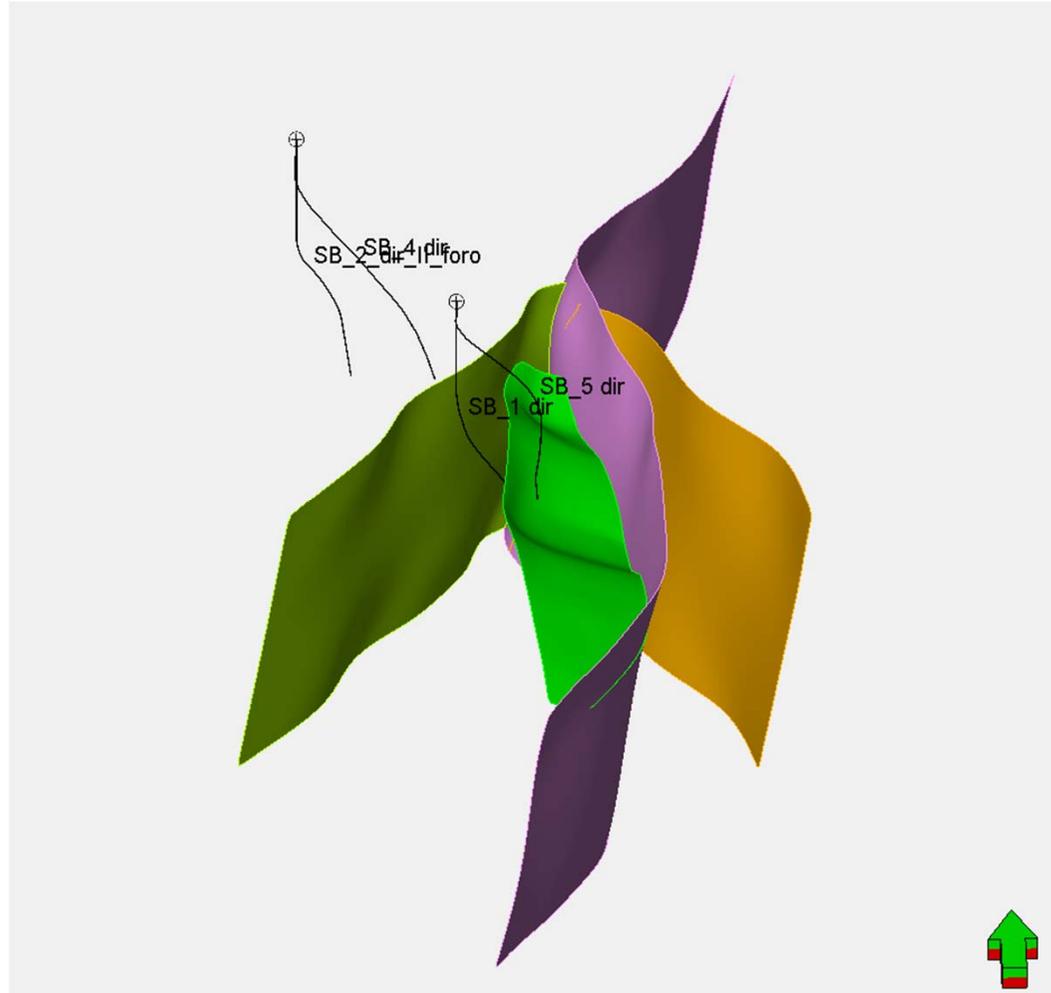


Figura 2 – Modello strutturale dell'area (*thrust* orientale – viola; *thrust* occidentale – verde scuro; *backthrust* – verde chiaro)

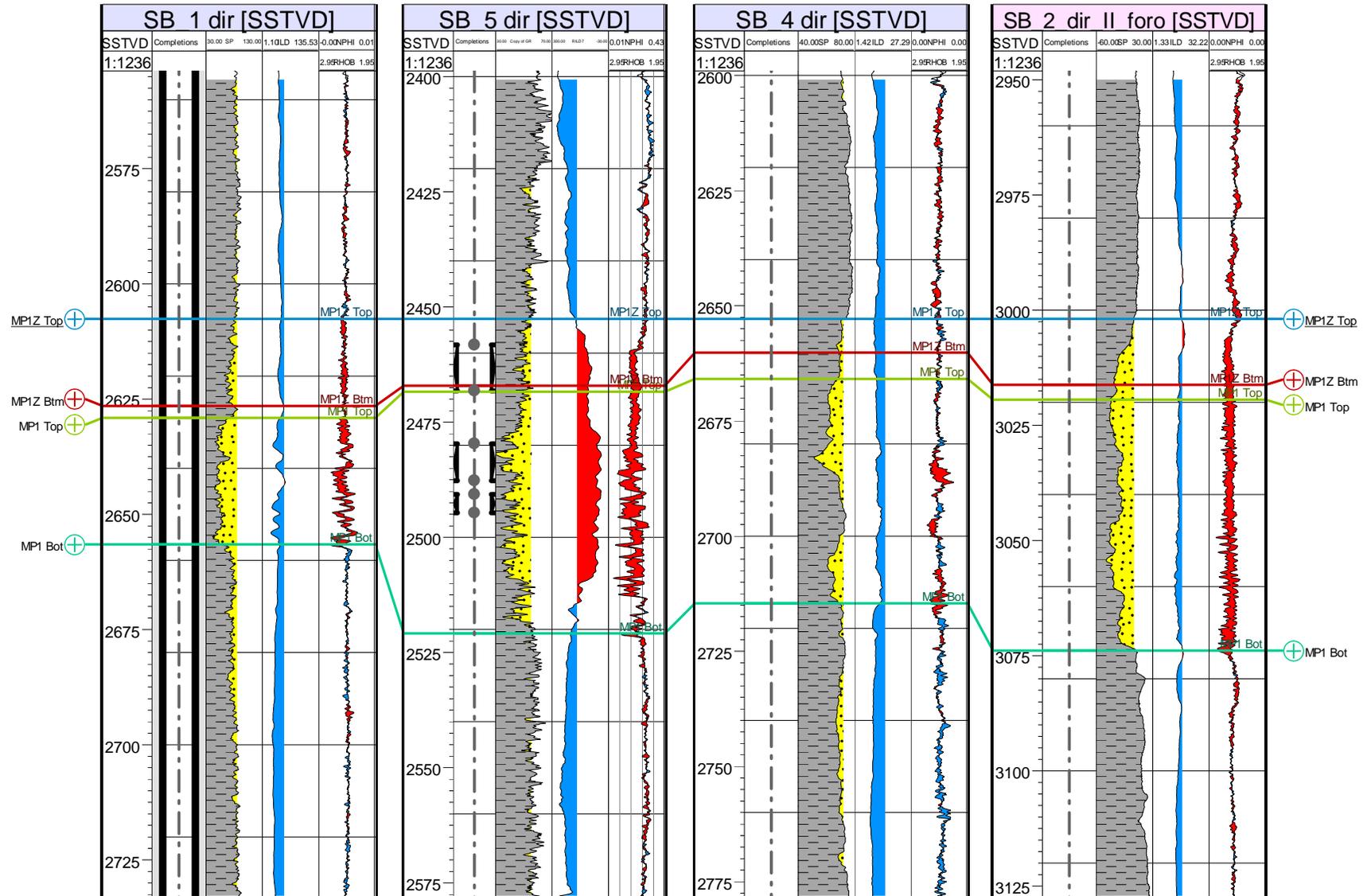


Figura 3 - Correlazione dei livelli *reservoir* MP1z e MP1 – formazione Montepagano

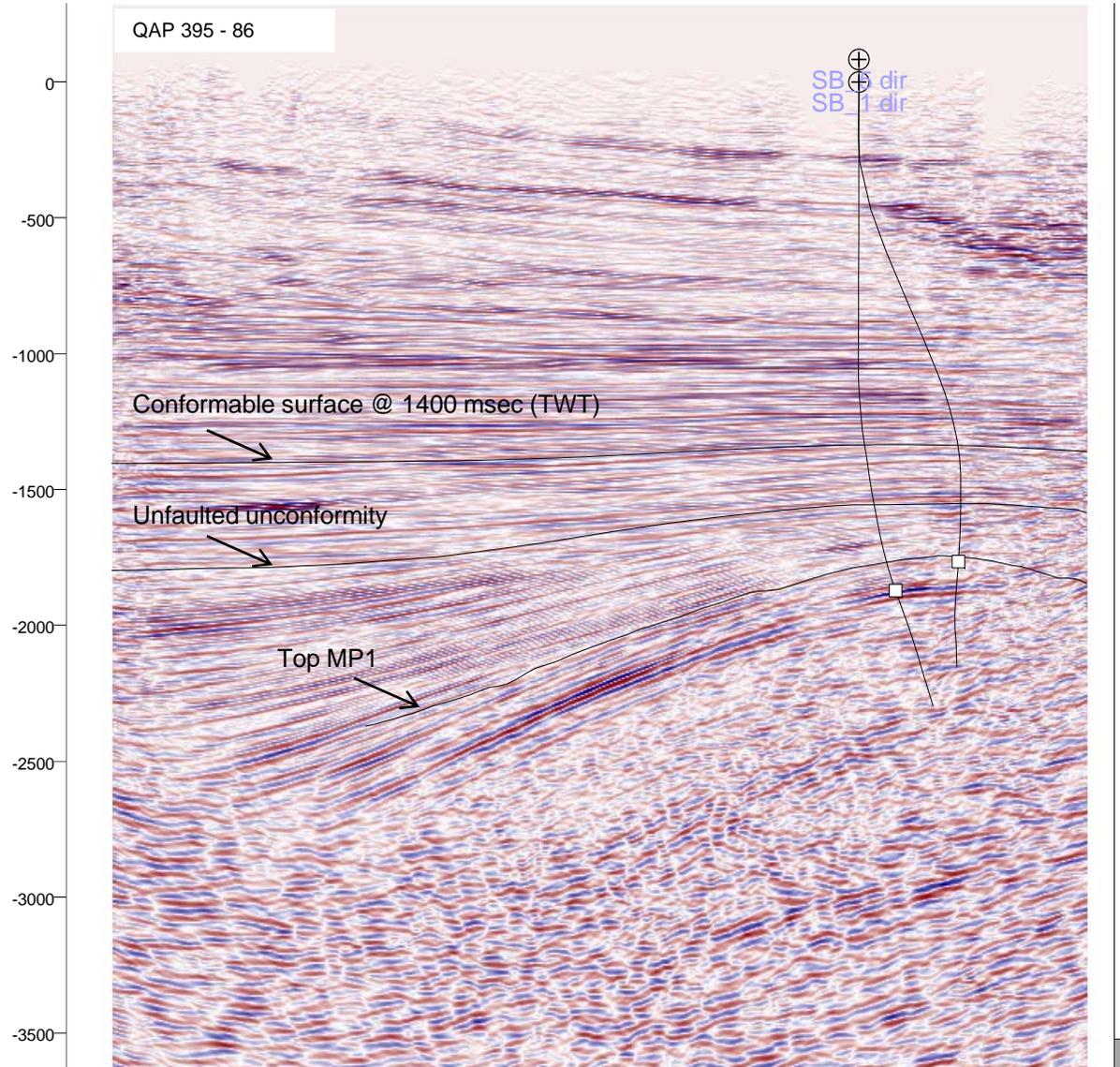


Figura 4 – Sezione sismica QAP – 86 - Orizzonti sismici interpretati

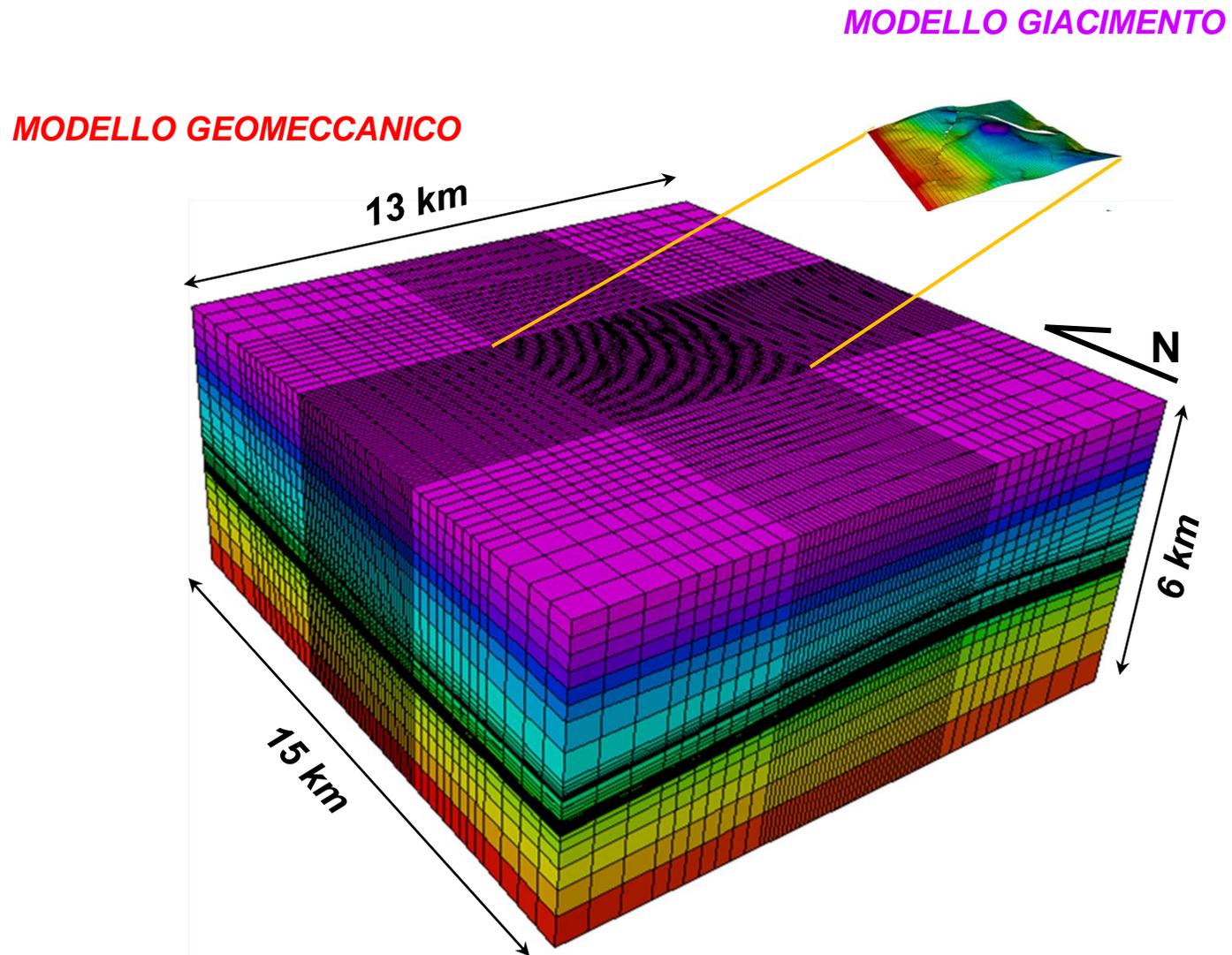


Figura 5 – Estensione dell'area modellizzata

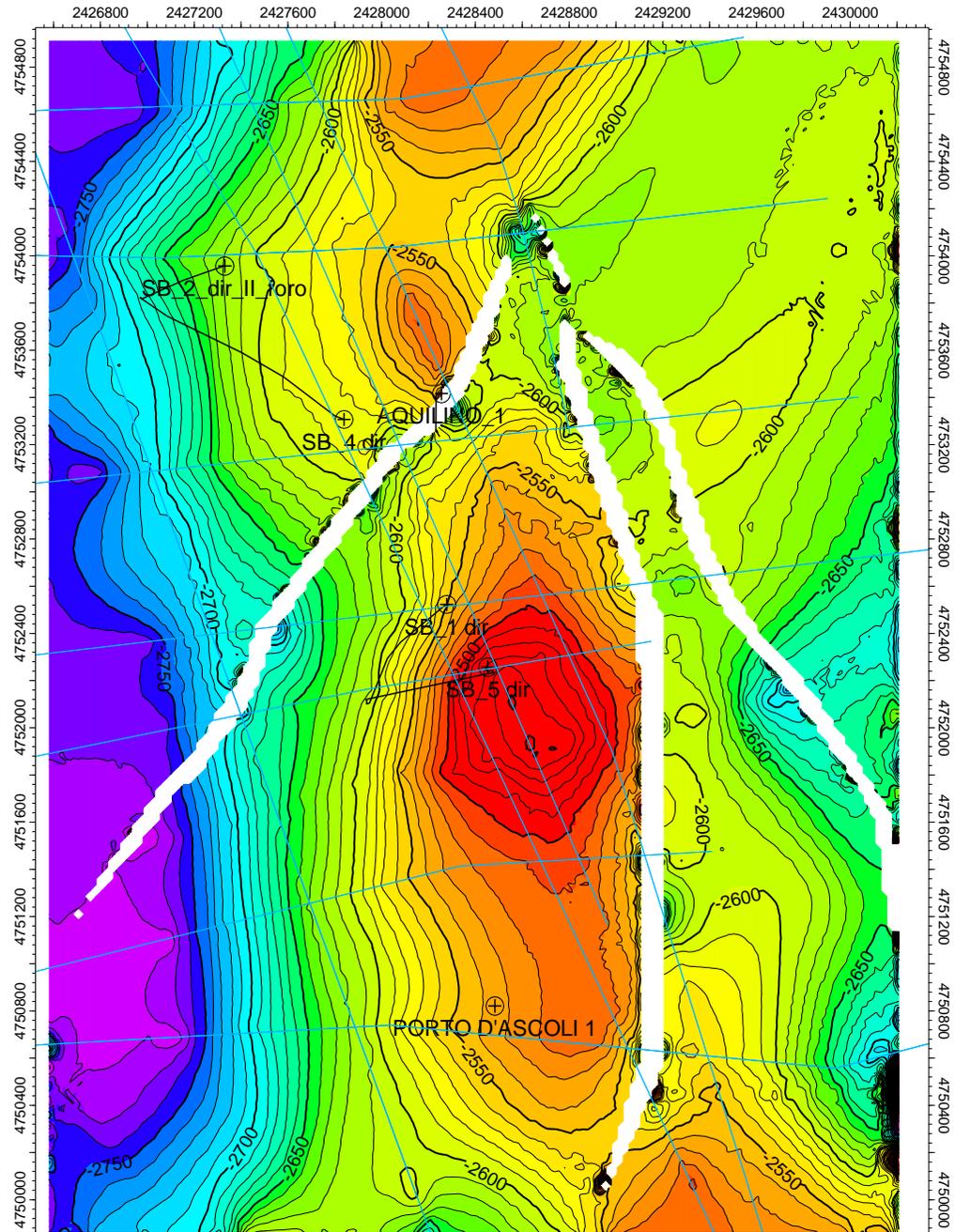


Figura 6 – Top livello MP1 – formazione Montepagano (mappa profondità)

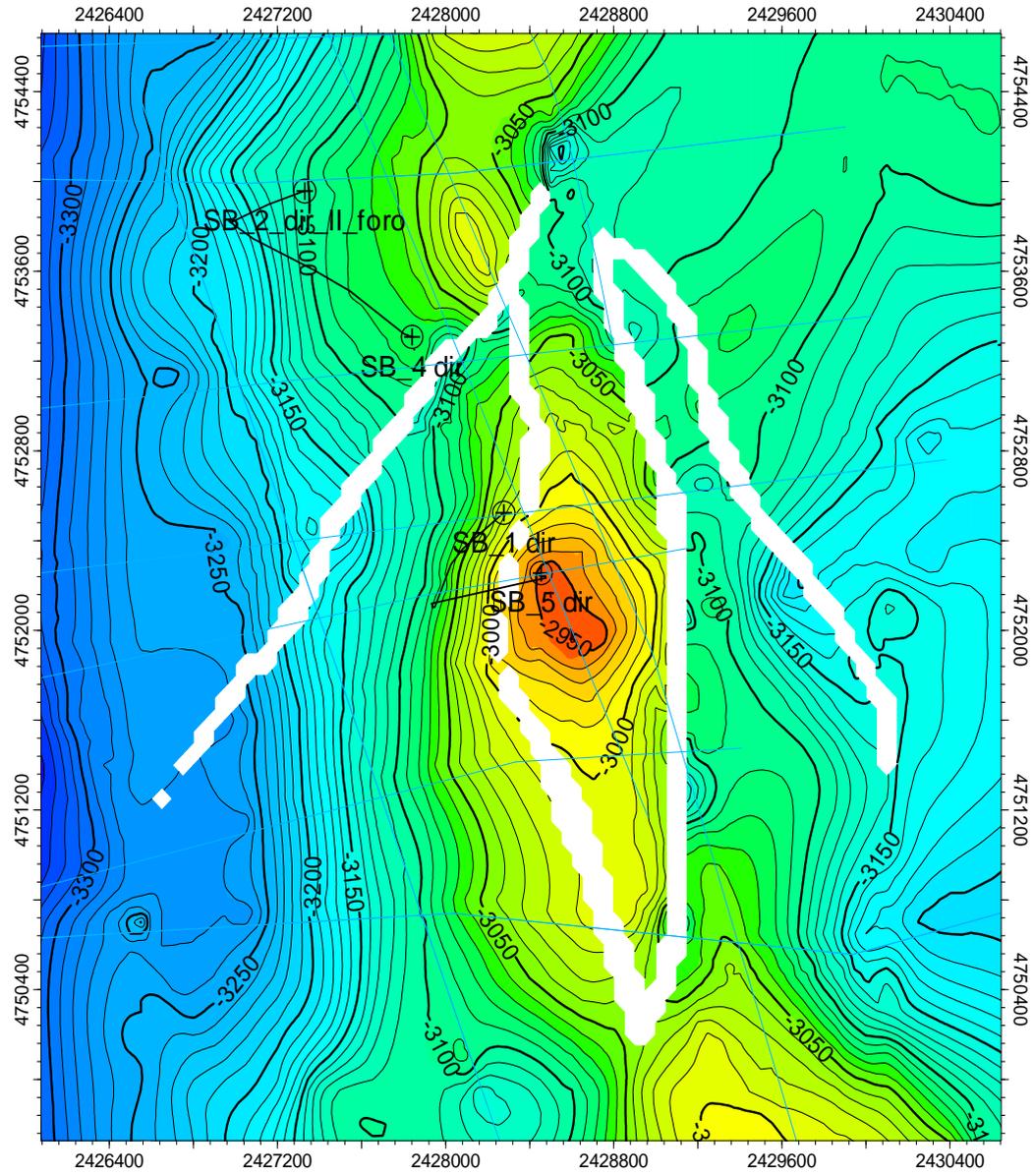


Figura 7 – Top livello San Benedetto 1 - formazione Alternanze (mappa profondità)

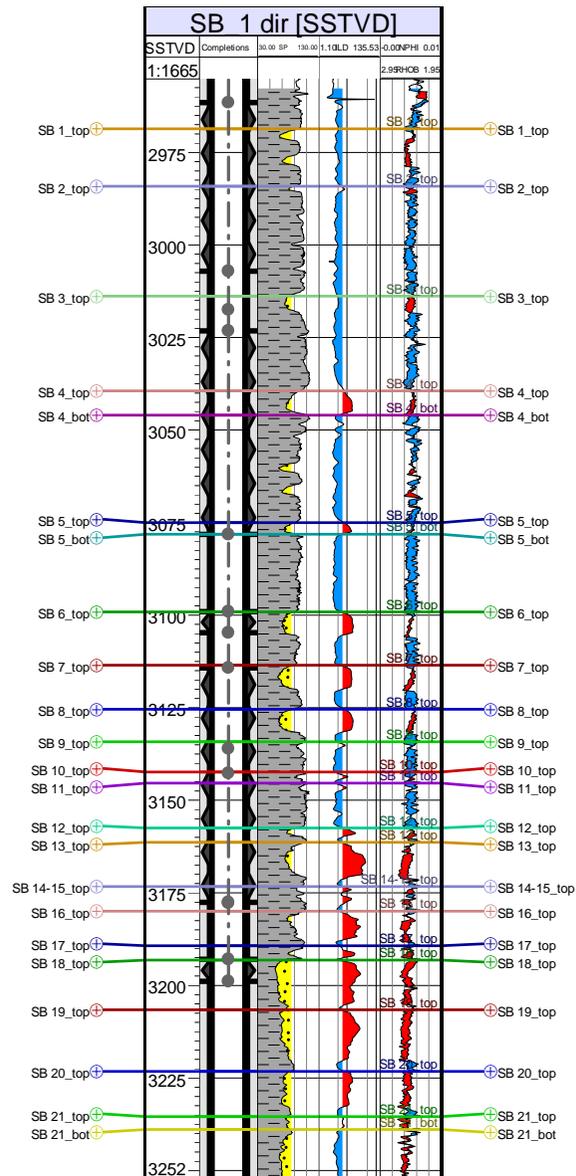


Figura 8 – Zonazione dei livelli *reservoir* San Benedetto 1 - 21 (formazione Alternanze) al pozzo S. Benedetto 1 dir

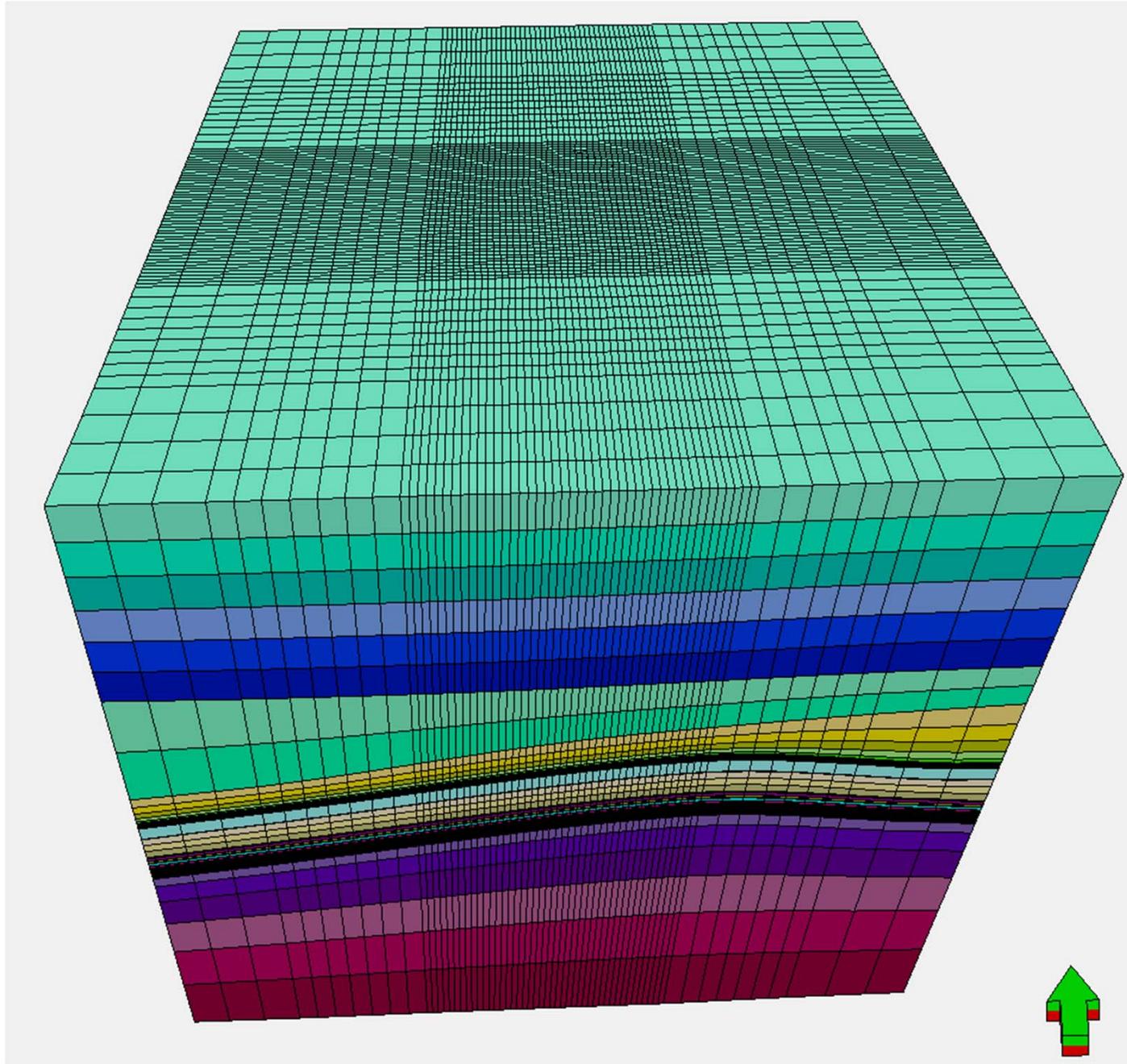
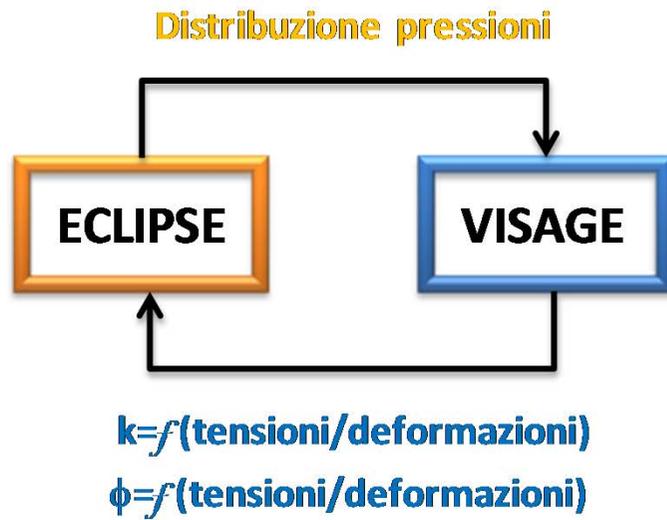
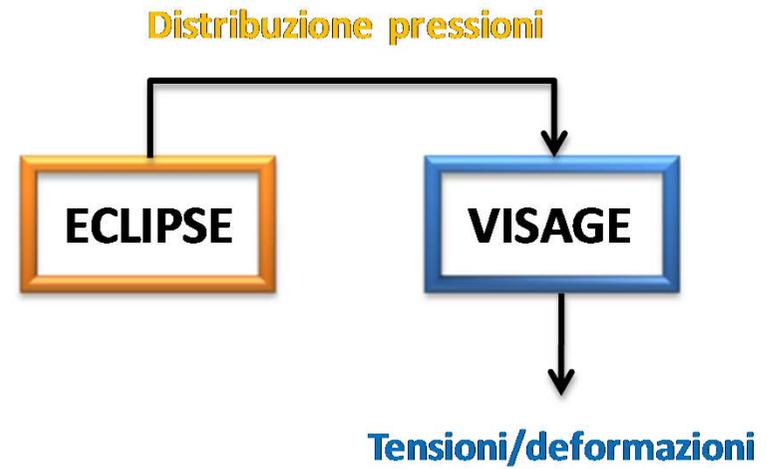


Figura 9 – Grid statico per la modellizzazione geomeccanica



(a)



(b)

Figura 10 – Schema esplicativo per l’approccio *iteratively coupling* (a) e *one-way coupling* (b)

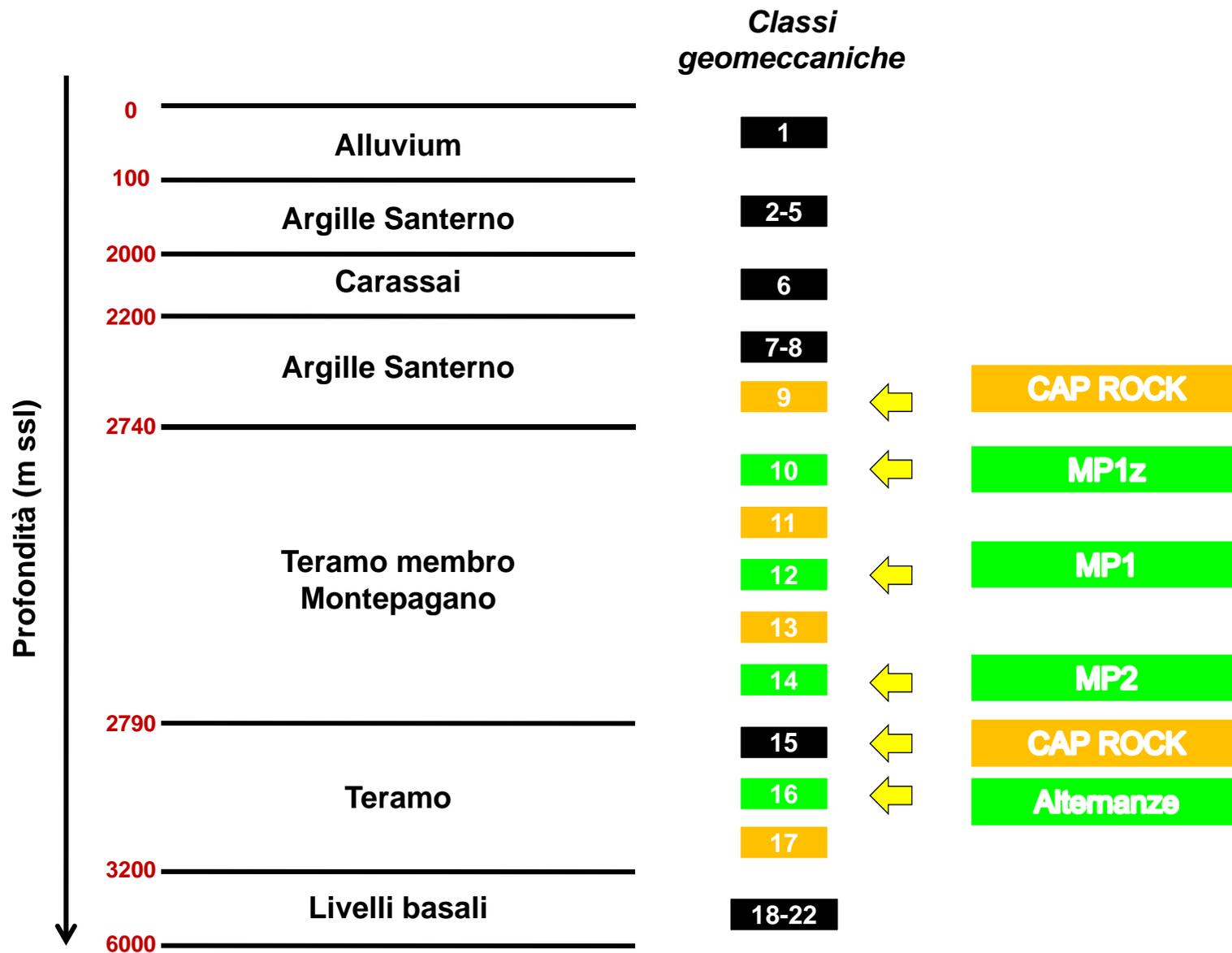


Figura 11 – Sequenza stratigrafica tipo e relative classi geomeccaniche associate



Deformazioni radiali e longitudinali - Campione D

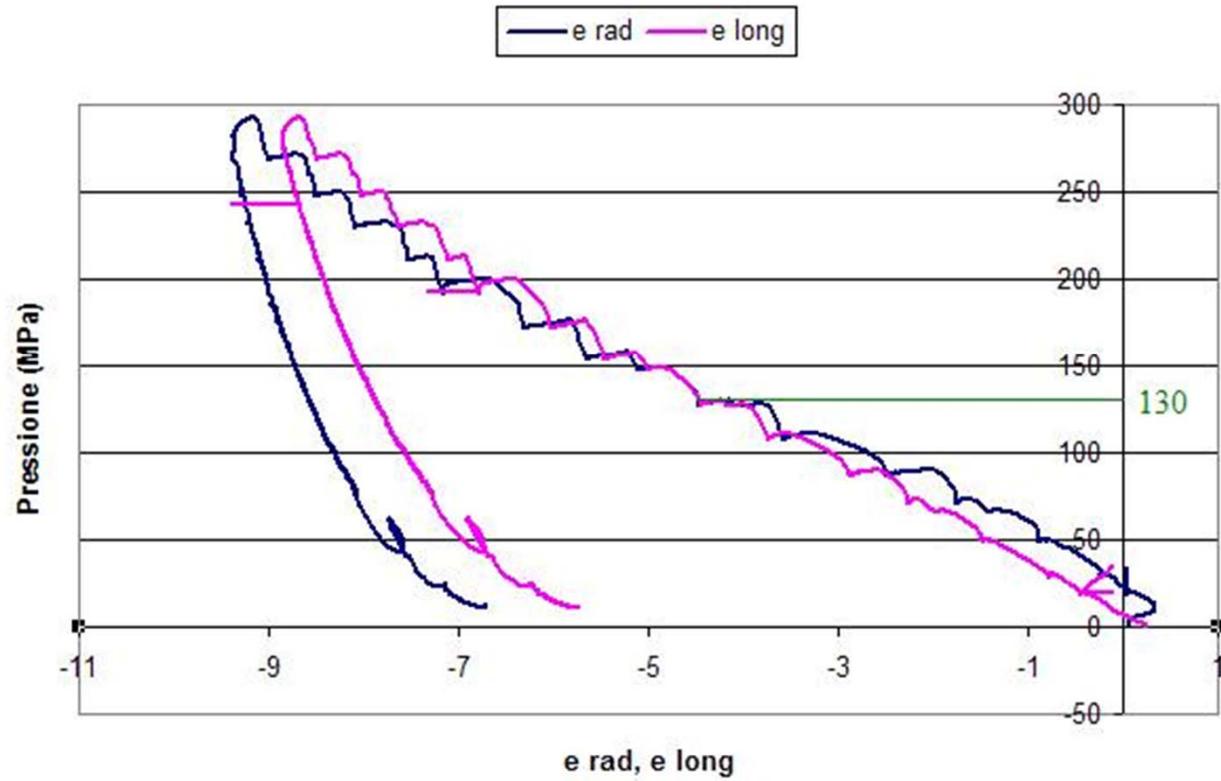


Figura 12 – Andamento della deformazione radiale e longitudinale per il campione D durante l'intero ciclo carico - scarico di prova (Mauri, 2010)

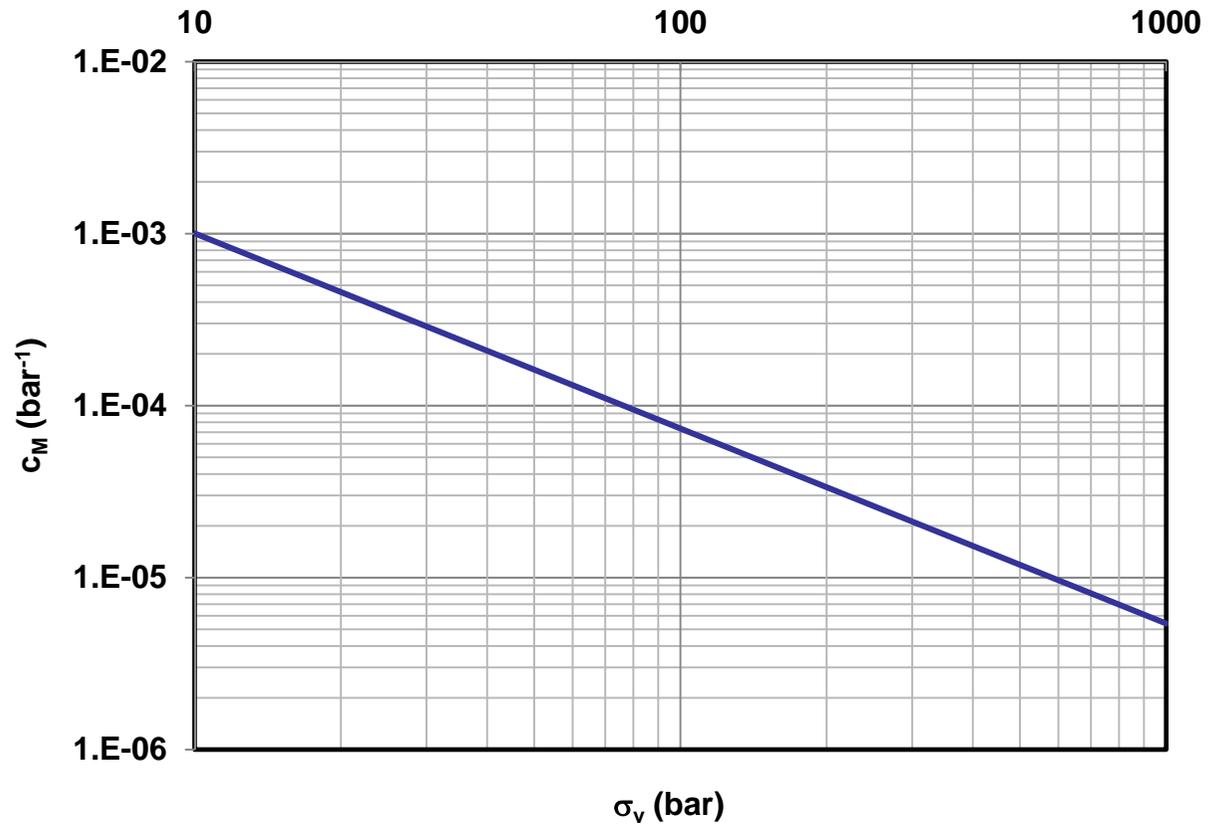


Figura 13 – Correlazione tra tensione verticale efficace e compressibilità verticale (Teatini, 2011)

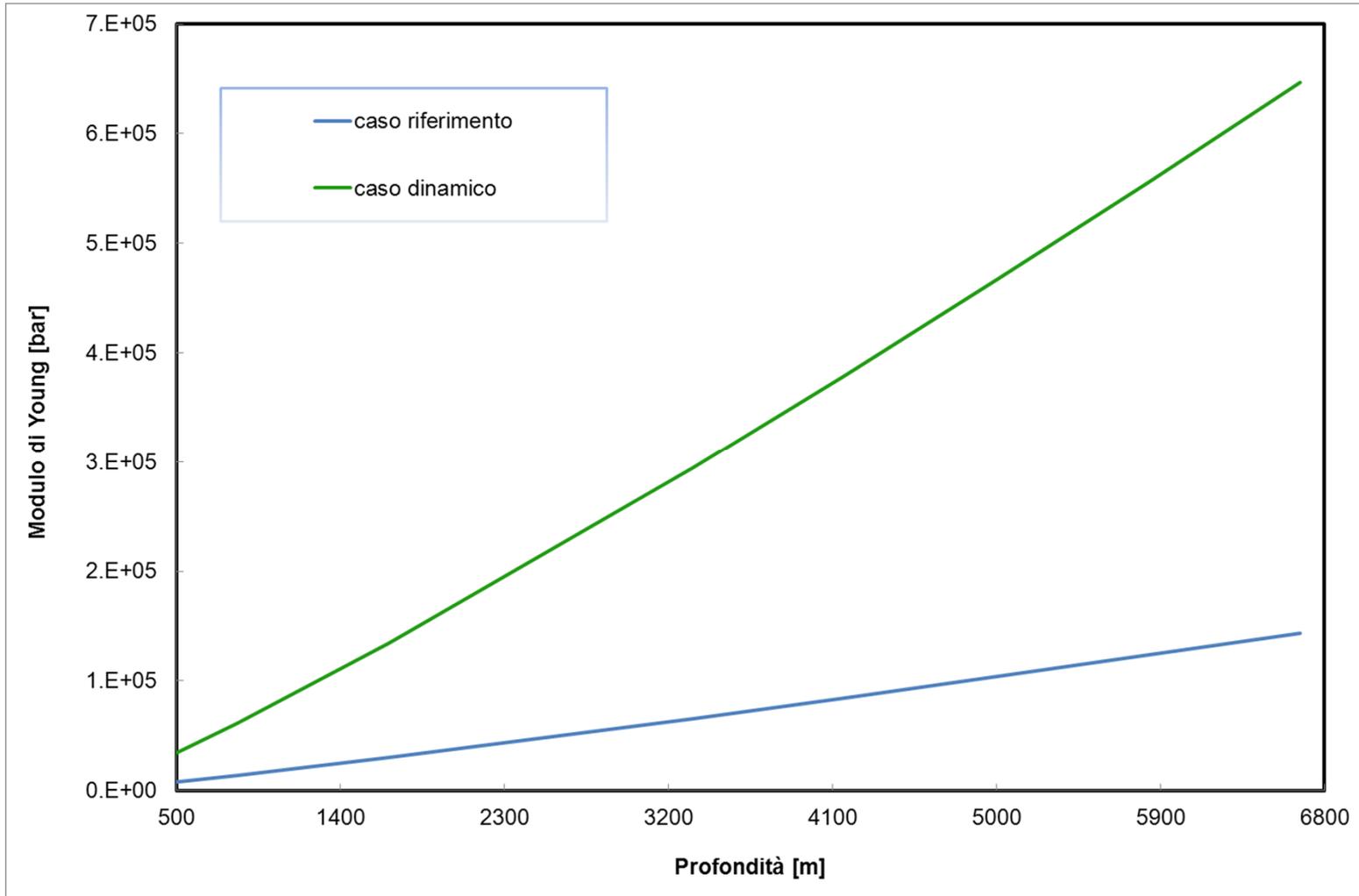


Figura 14 – Andamento del modulo elastico statico e dinamico in funzione della profondità

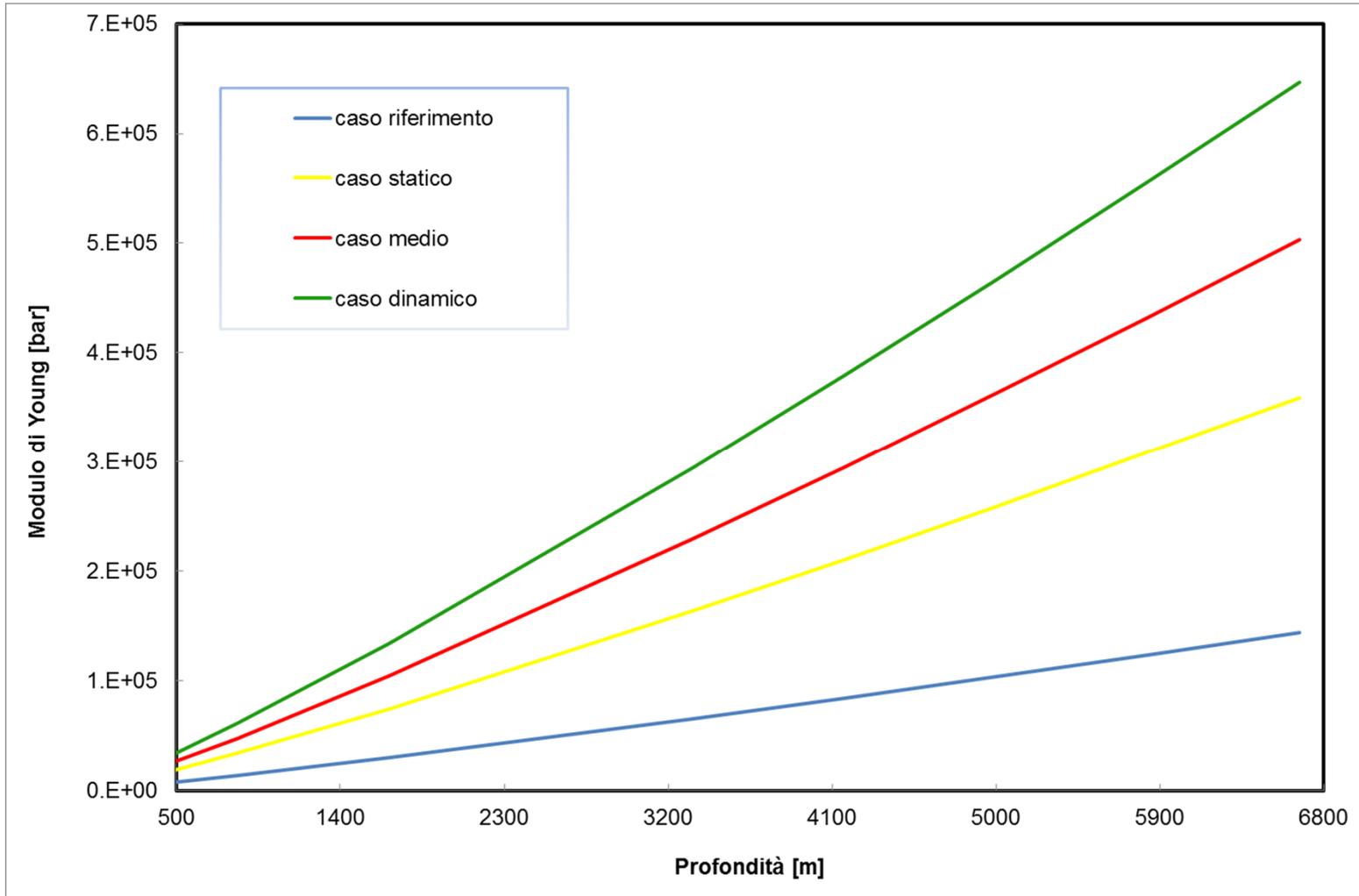
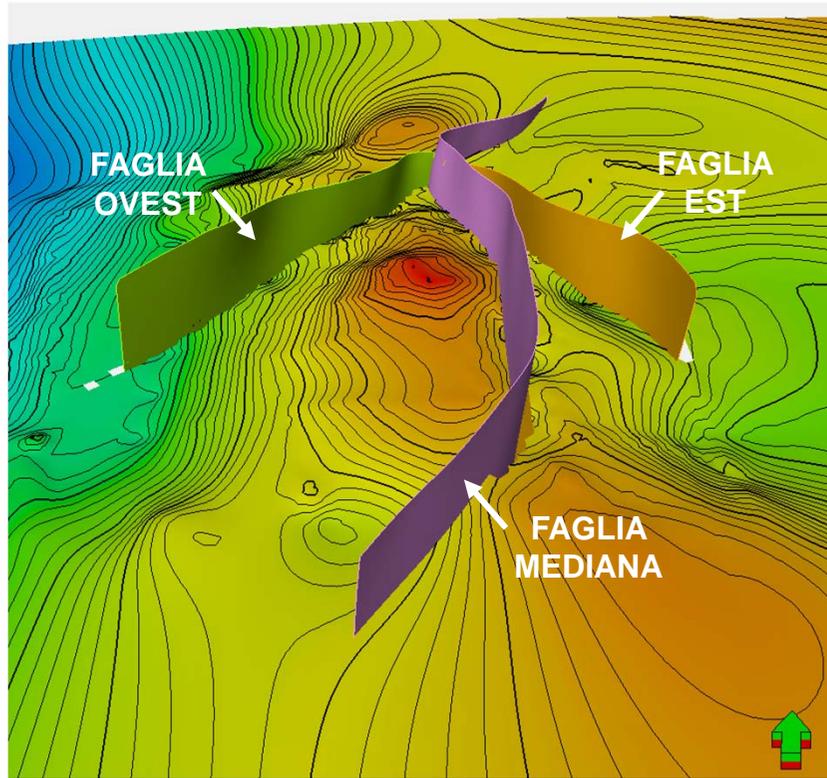
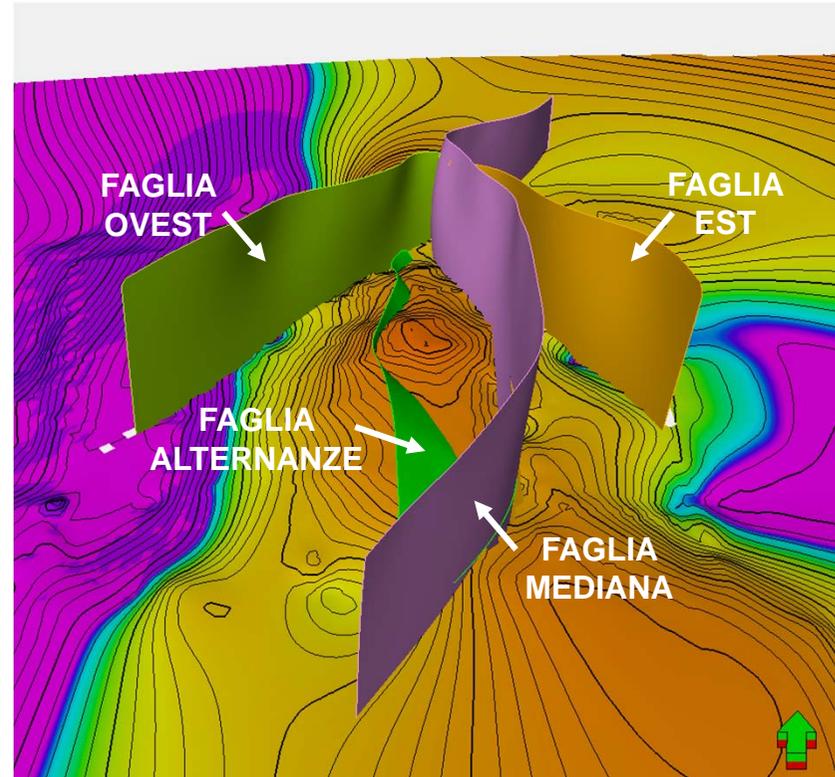


Figura 15 – Andamento del modulo elastico in funzione della profondità per i casi analizzati



(a)



(b)

Figura 16 – Dislocazione delle faglie caratterizzate ai fini dello studio geomeccanico: top f.ne Montepagano (a) e top f.ne Alternanze (b)

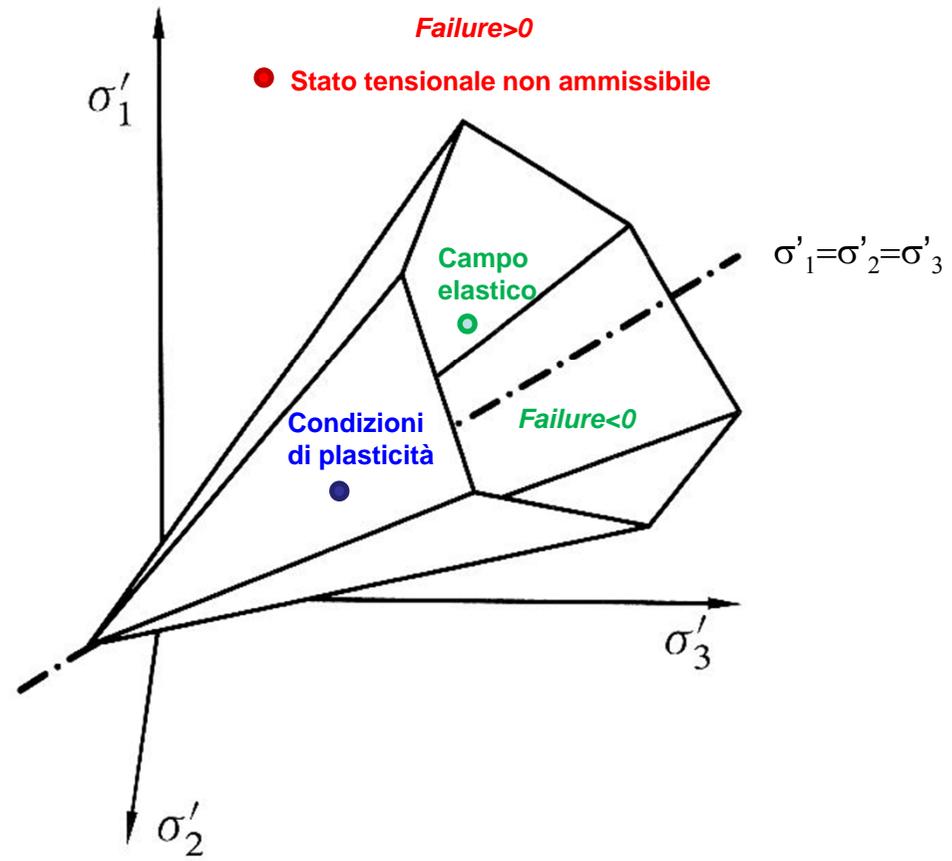
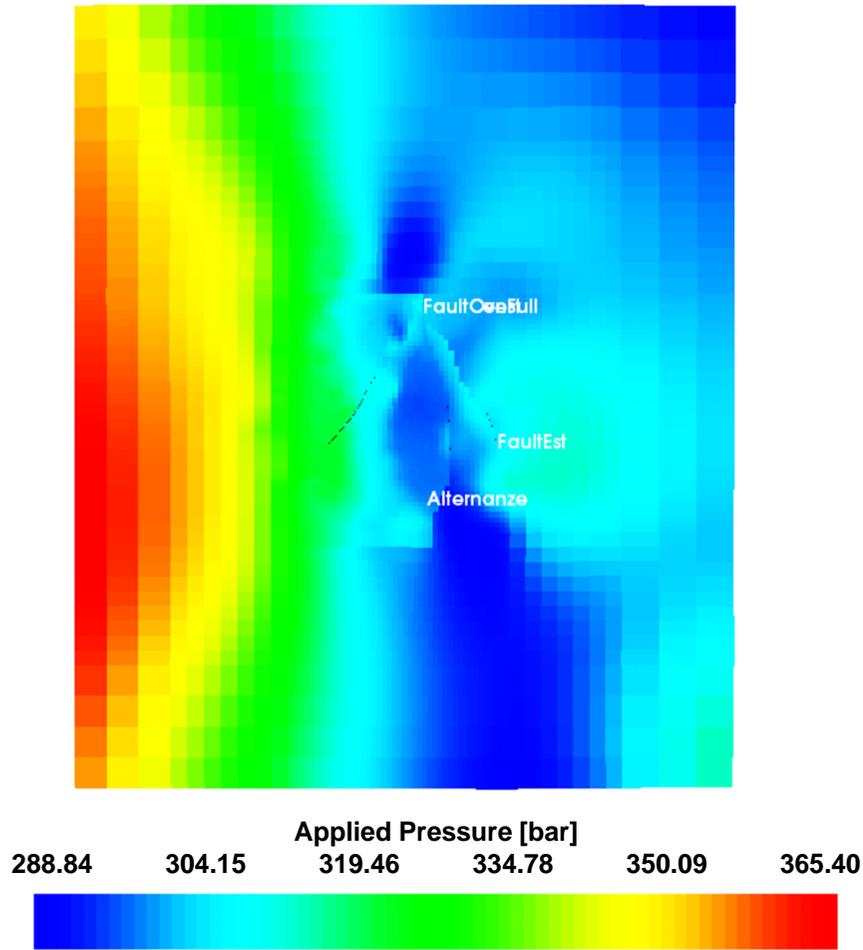
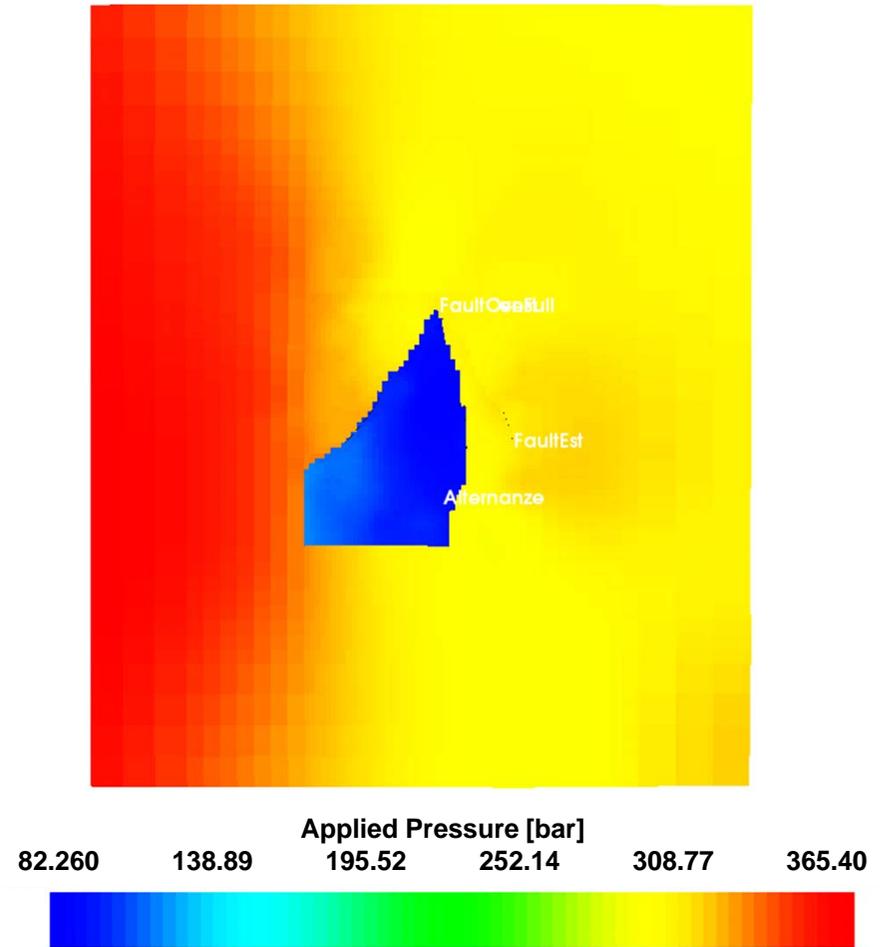


Figura 17 – Criterio di Mohr-Coulomb sul piano delle tensioni principali (FJÆR, 2008)



(a)



(b)

Figura 18 – Top f.ne Montepagano: distribuzione delle pressioni iniziali (a), al termine della produzione primaria (b)

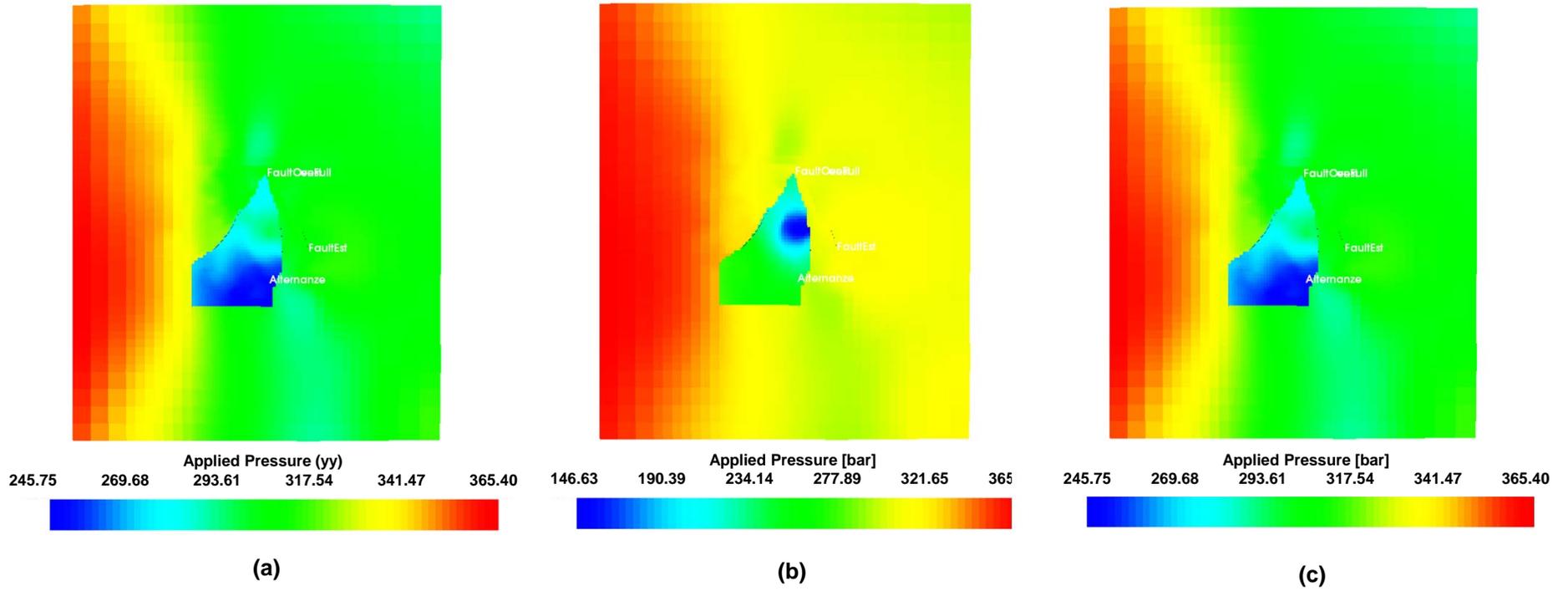


Figura 19 – Top f.ne Montepagano: distribuzione delle pressioni a fine ricostituzione (a), al termine di un ciclo di produzione a $THP_{min}=75$ barsa (b) e al termine di un ciclo di iniezione (c)

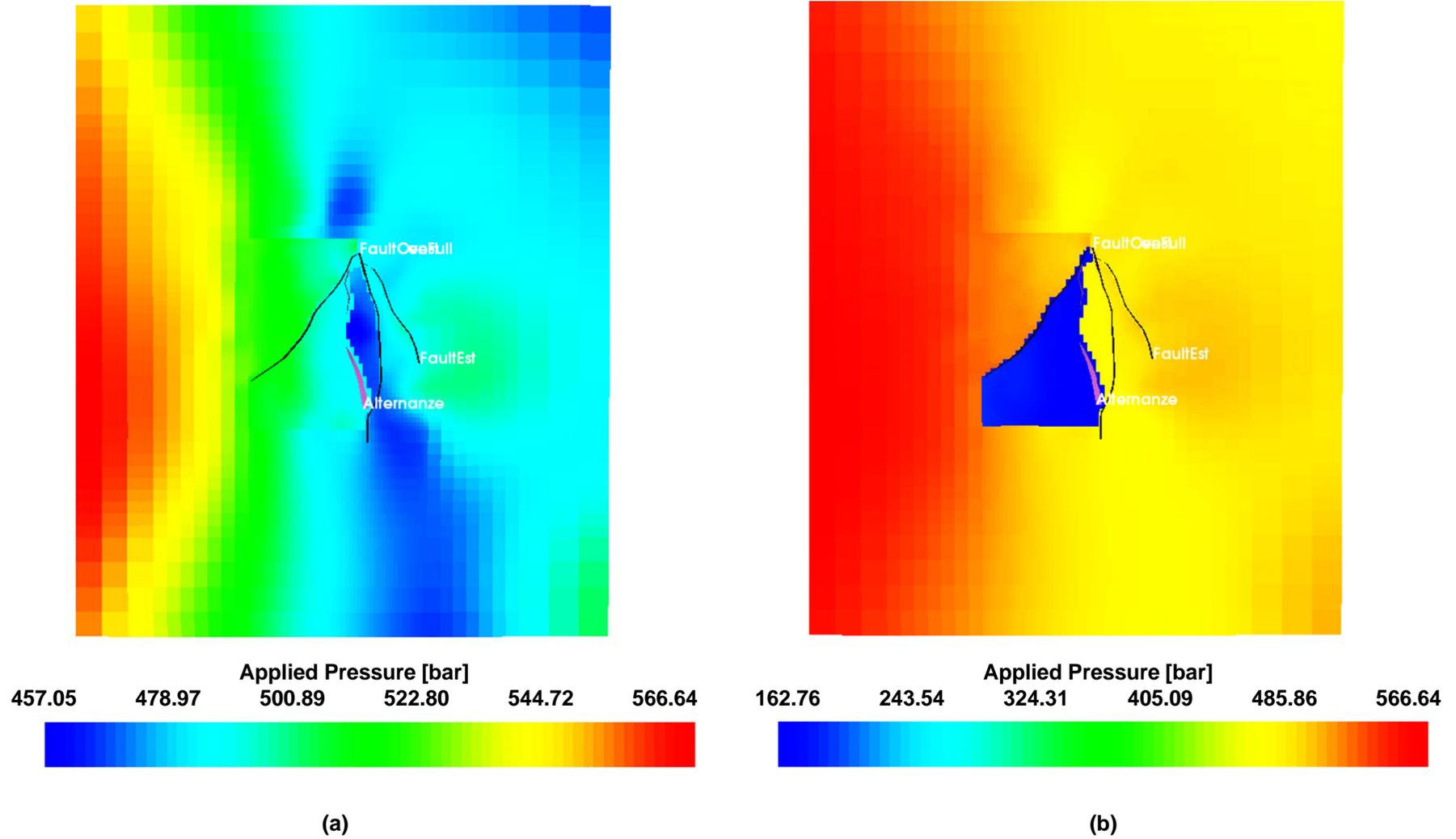


Figura 20 – Top f.ne Alternanze – SB4 : distribuzione delle pressioni iniziali (a) e al termine della produzione primaria (b)

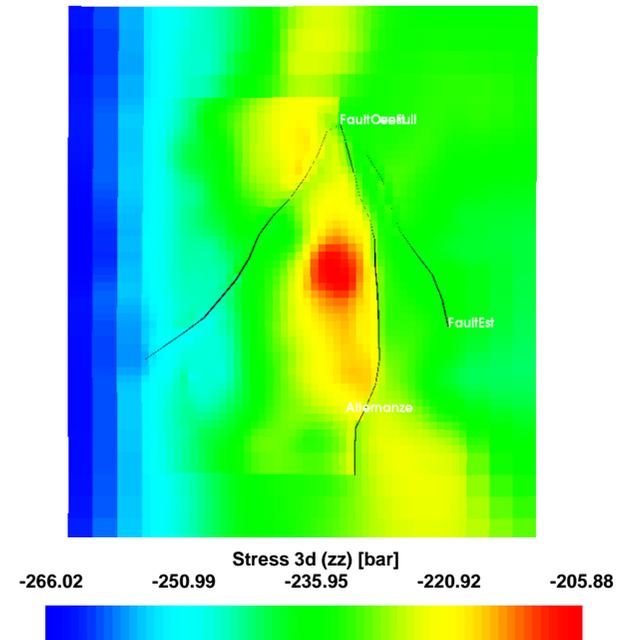
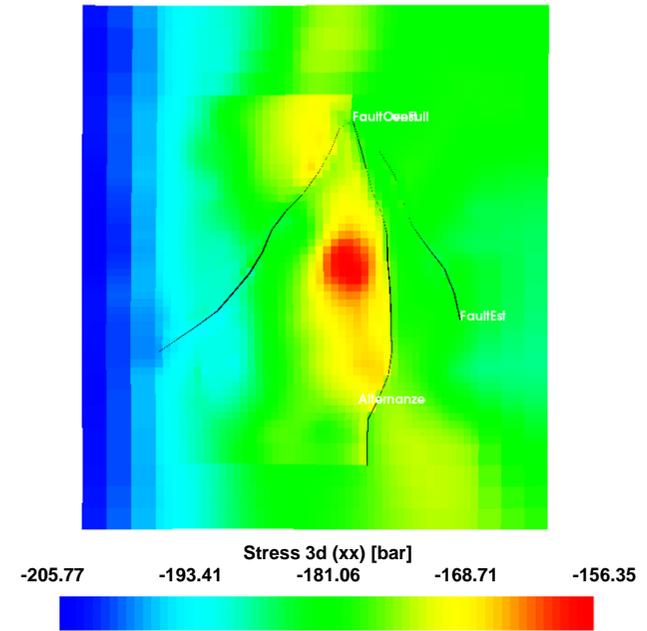
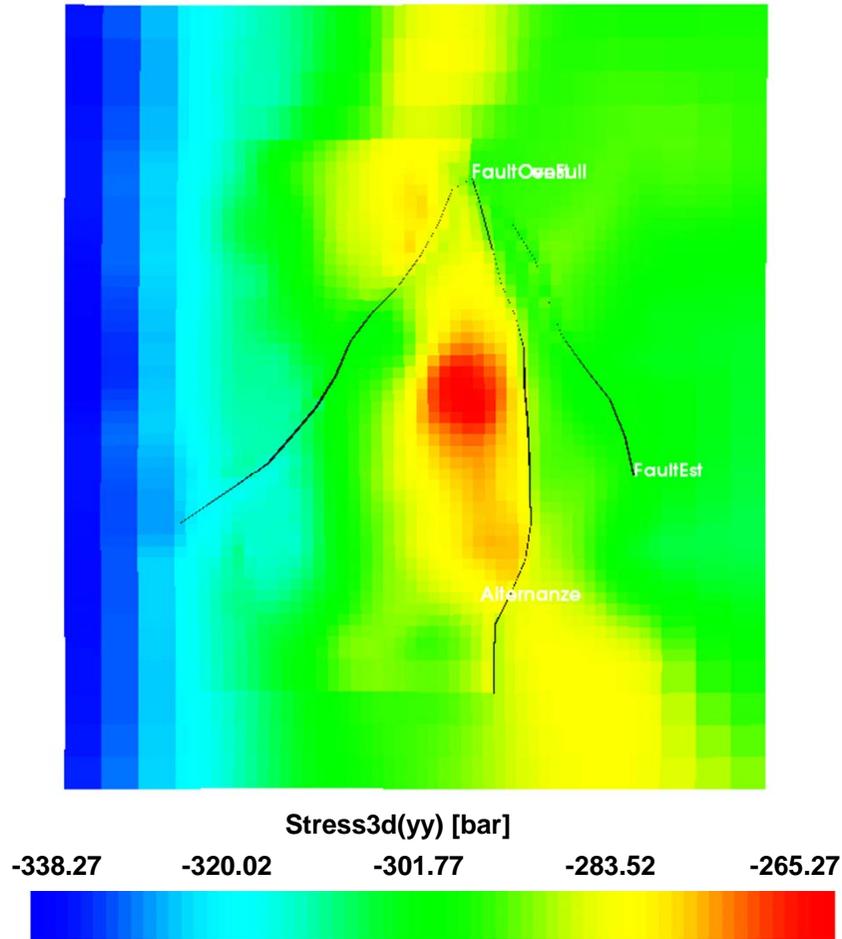


Figura 21 – Top f.ne Montepagano: tensioni efficaci iniziali verticali ed orizzontali

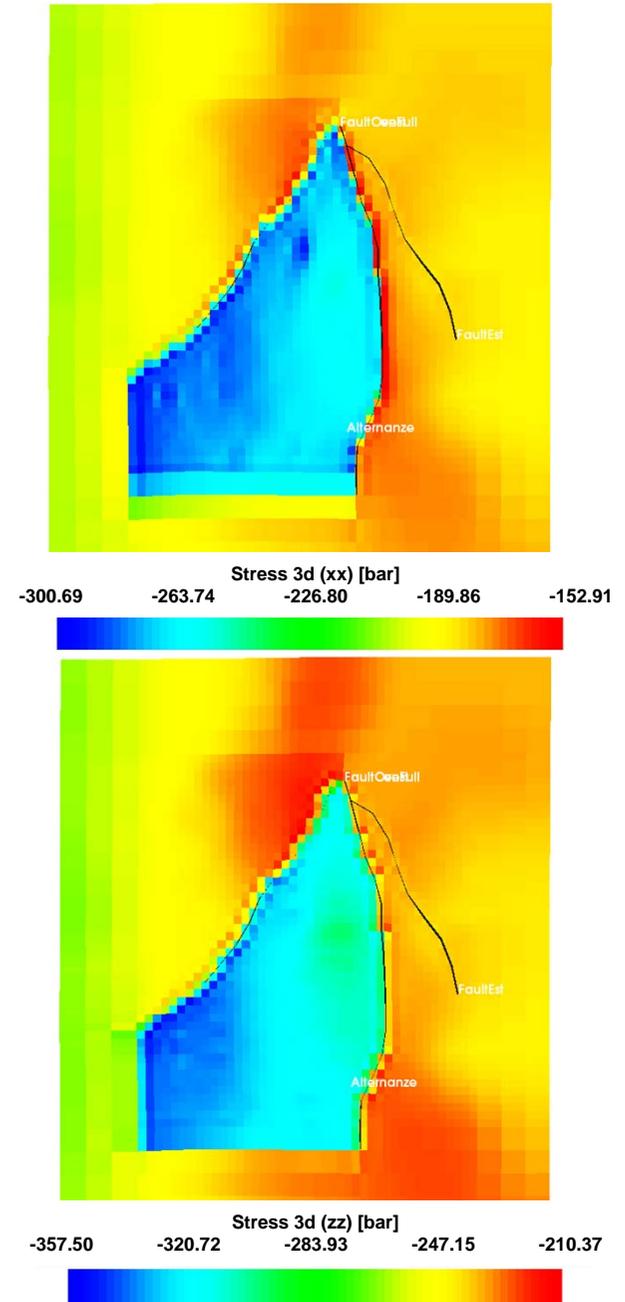
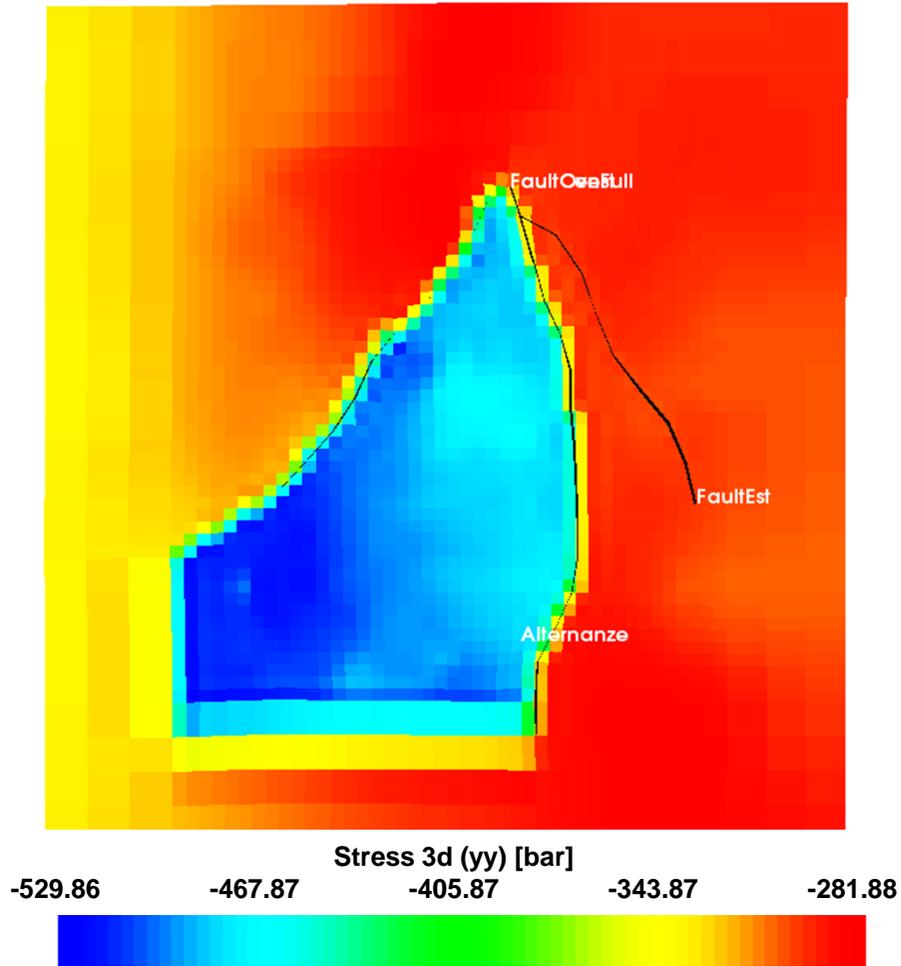


Figura 22 – Top f.ne Montepagano: tensioni efficaci verticali ed orizzontali alla fine della produzione primaria

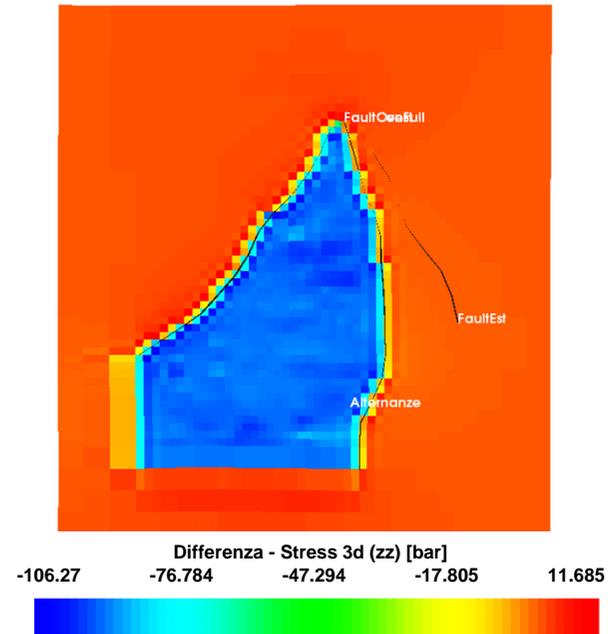
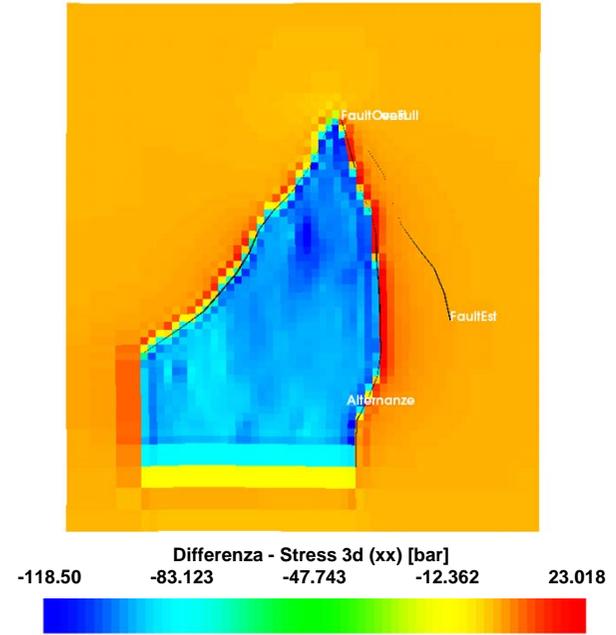
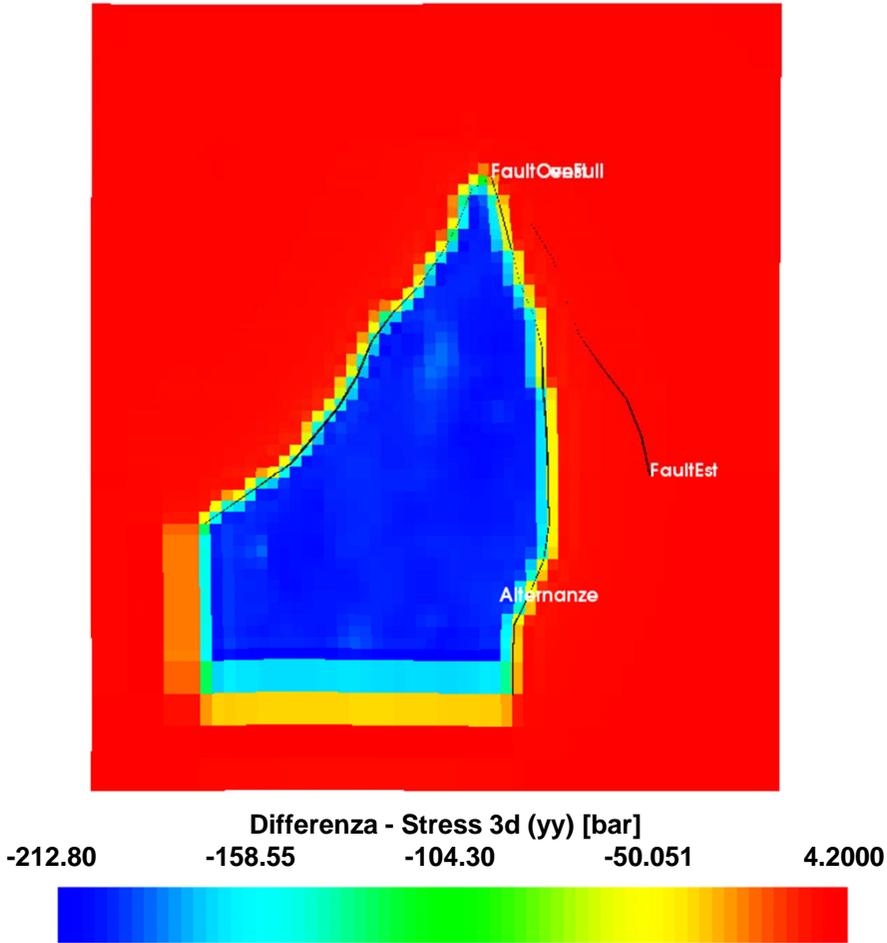


Figura 23 – Top f.ne Montepagano: differenza tra le tensioni efficaci al termine della produzione primaria rispetto al valore iniziale

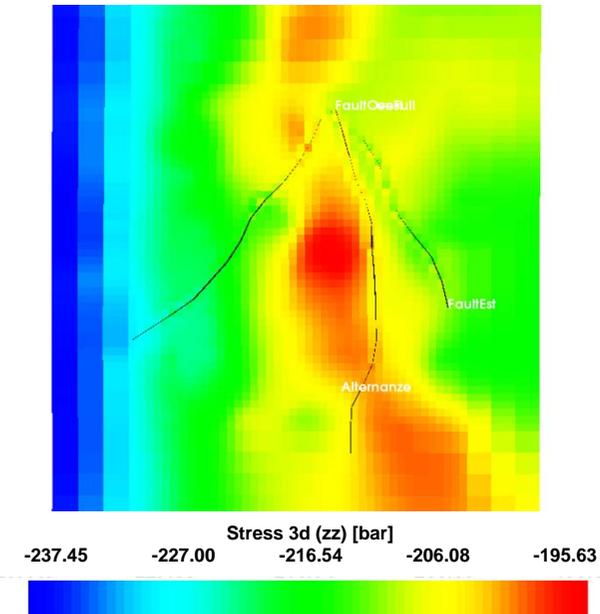
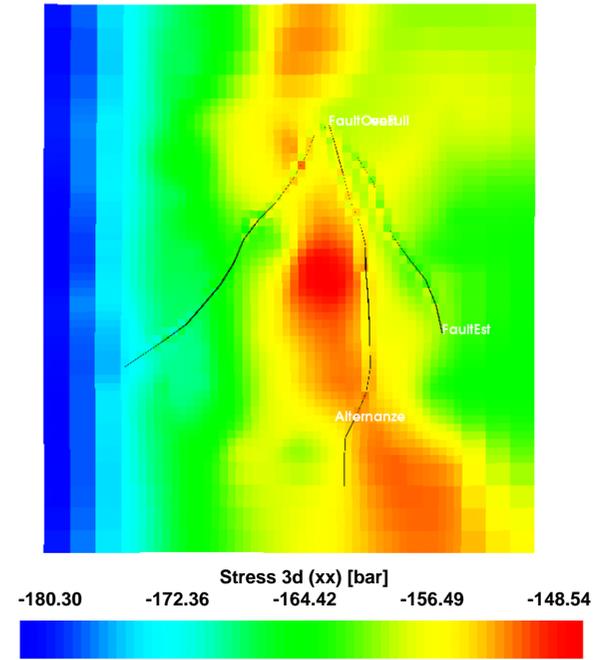
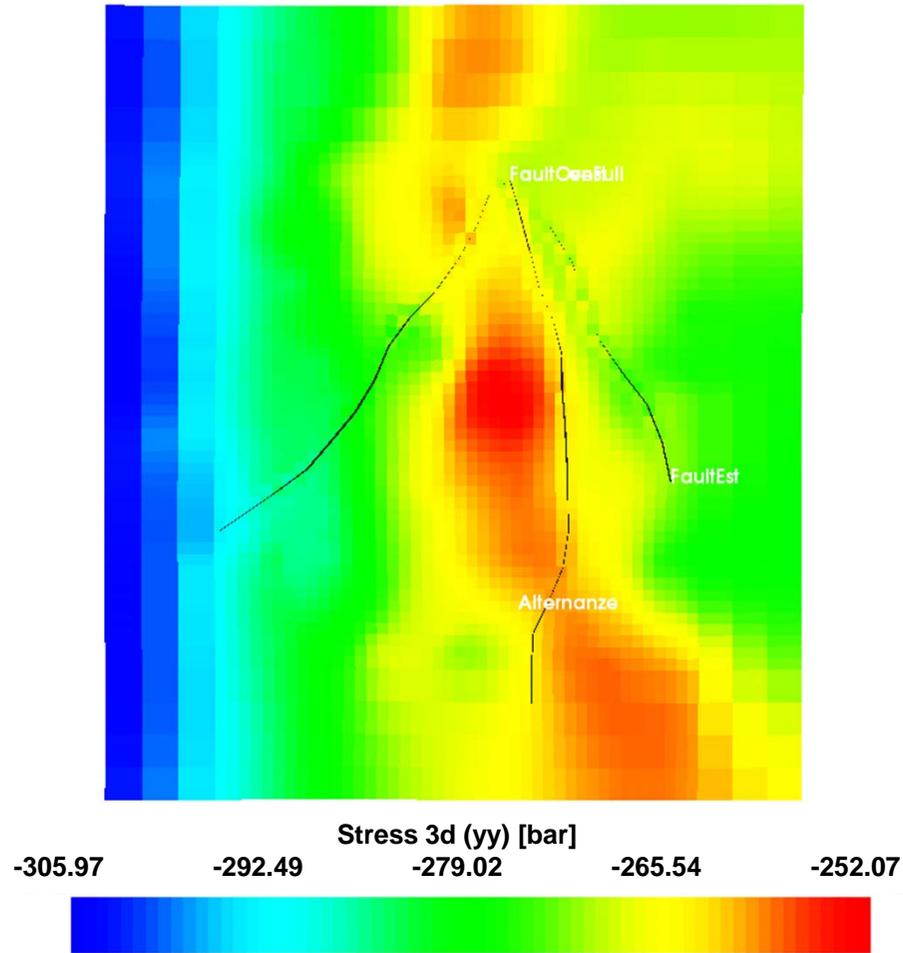


Figura 24 – Cap rock f.ne Montepagano: tensioni efficaci iniziali verticali ed orizzontali

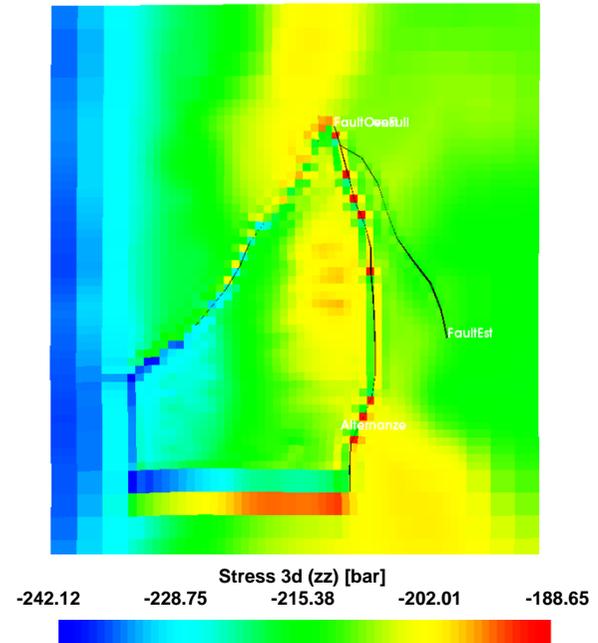
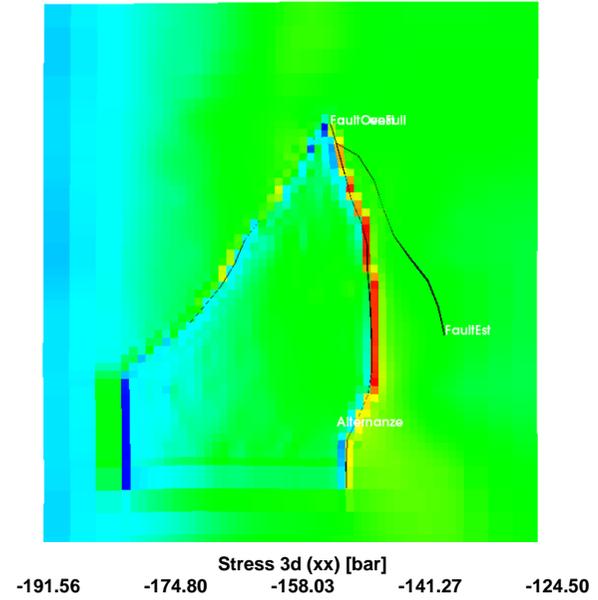
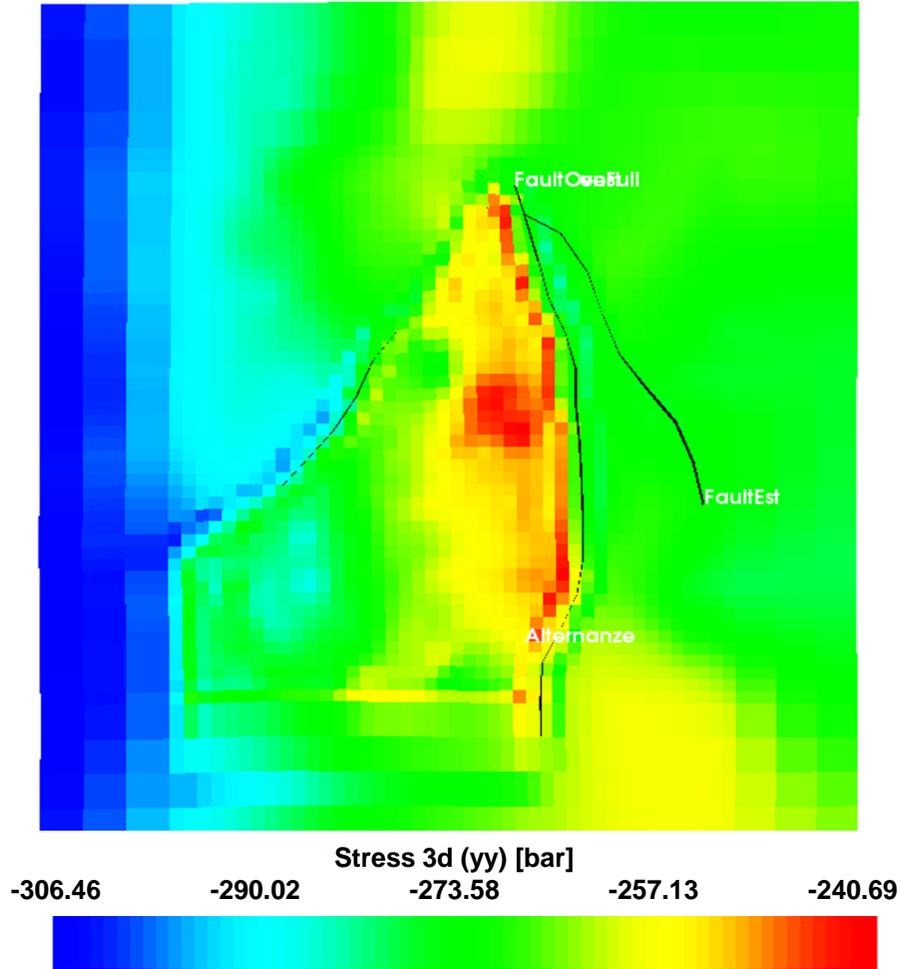


Figura 25 – Cap rock f.ne Montepagano: tensioni efficaci verticali ed orizzontali alla fine della produzione primaria

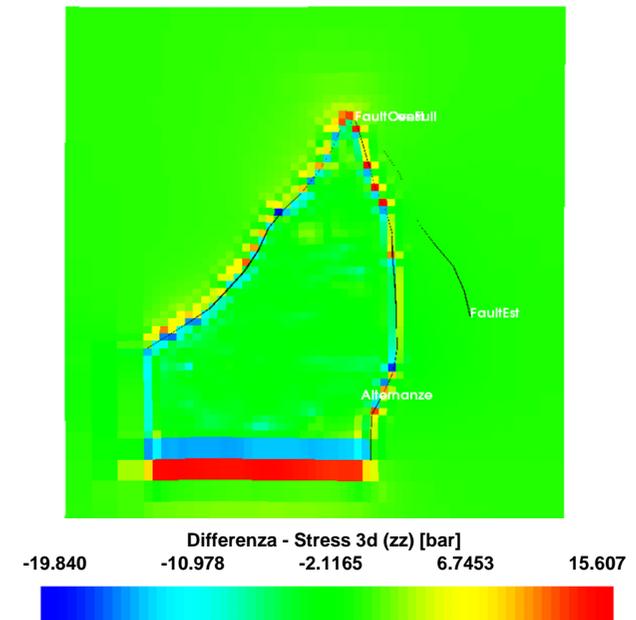
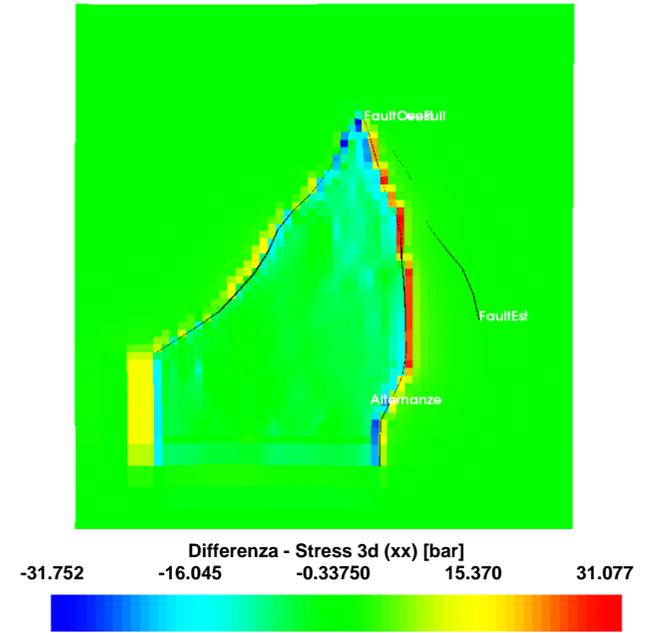
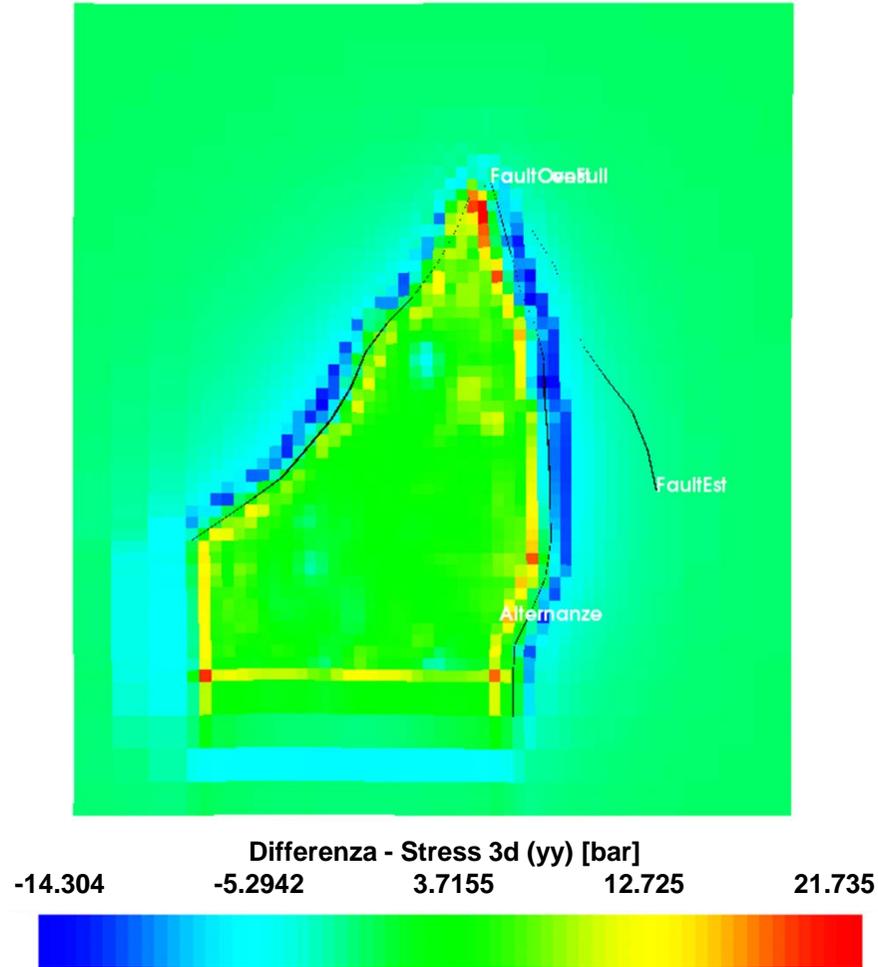
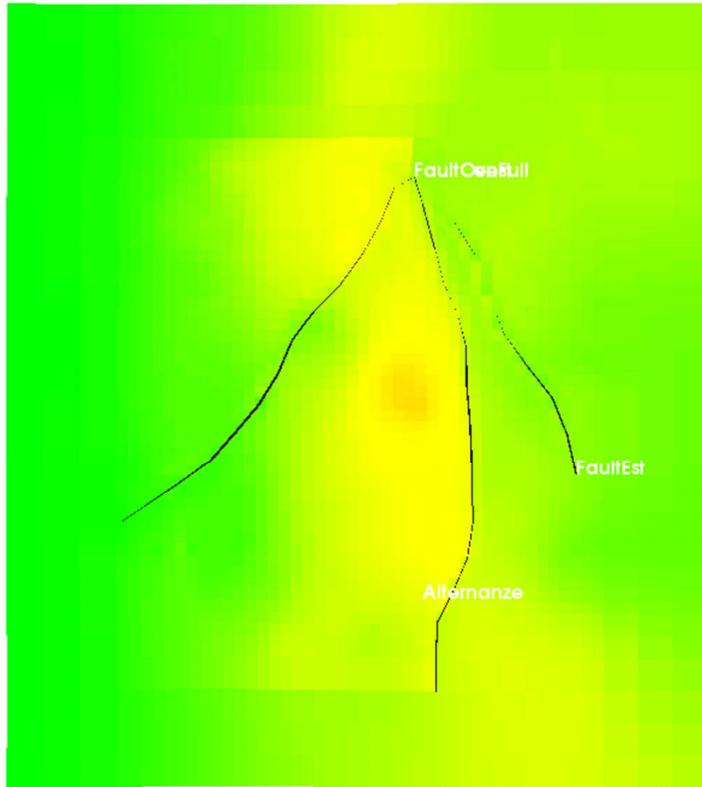
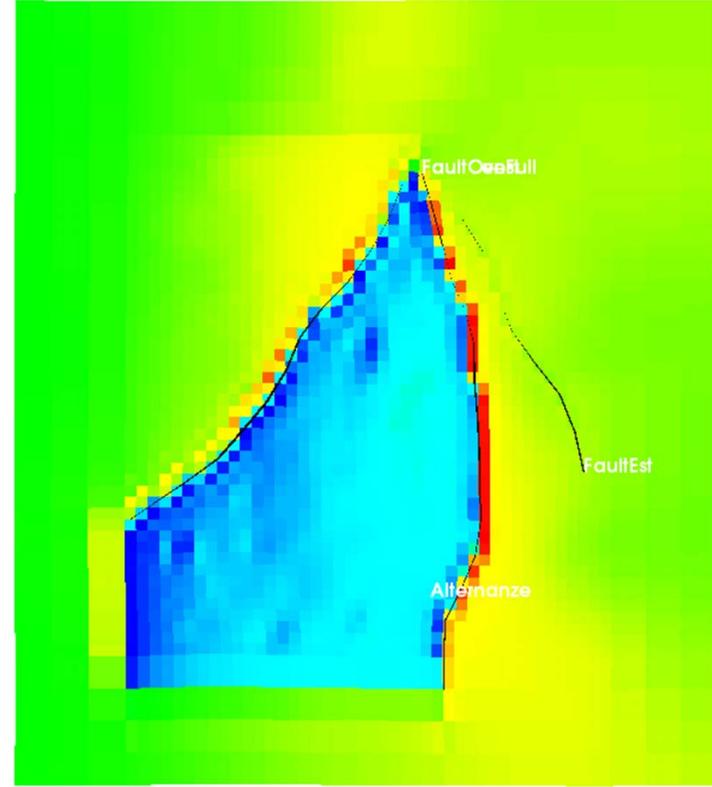


Figura 26 – Cap rock f.ne Montepagano: differenza tra le tensioni verticali efficaci al termine della produzione primaria rispetto al valore iniziale



(a)



(b)

Figura 27 – Top f.ne Montepagano: *failure* iniziali (a) e al termine della produzione primaria (b)

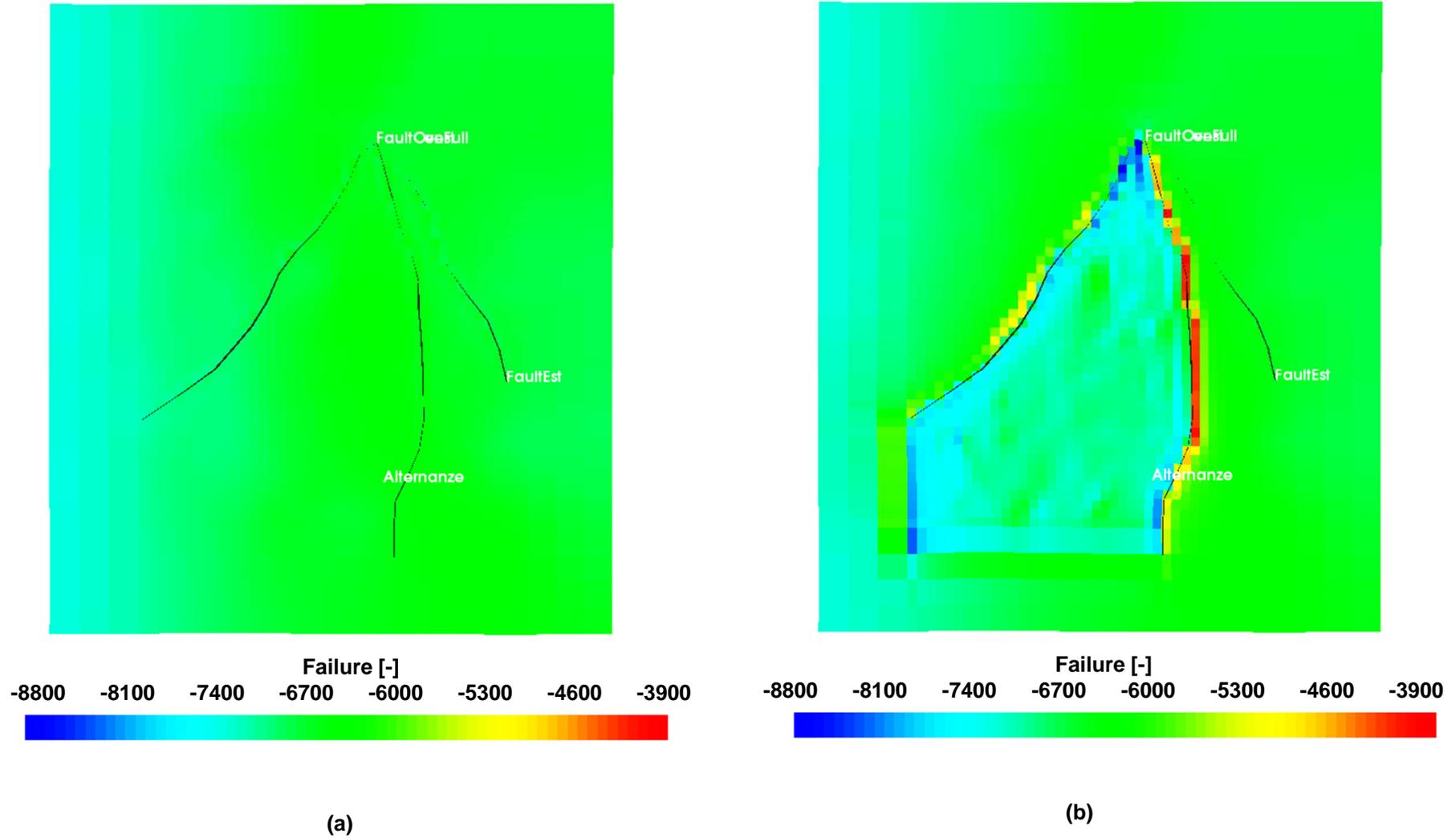
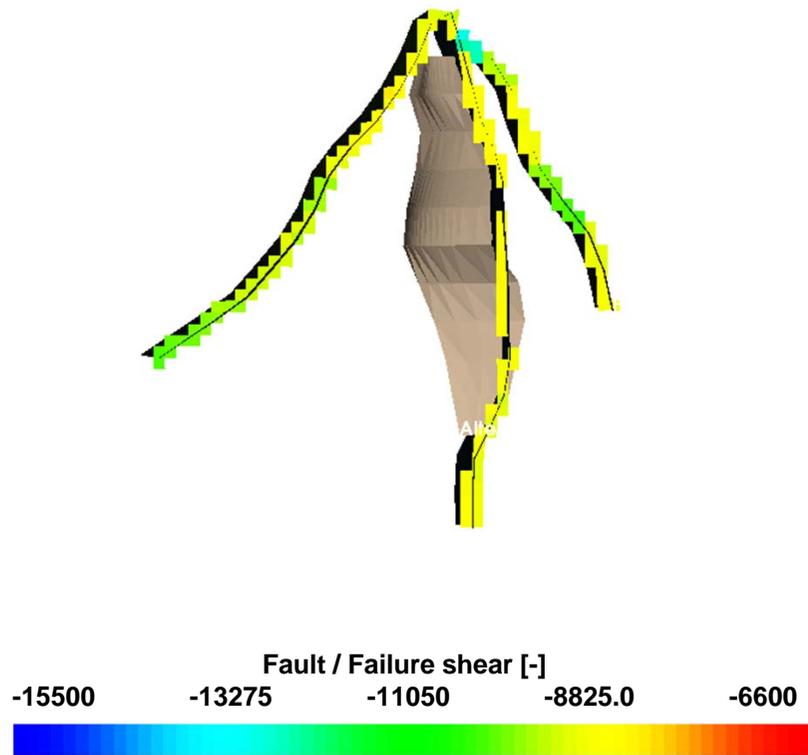
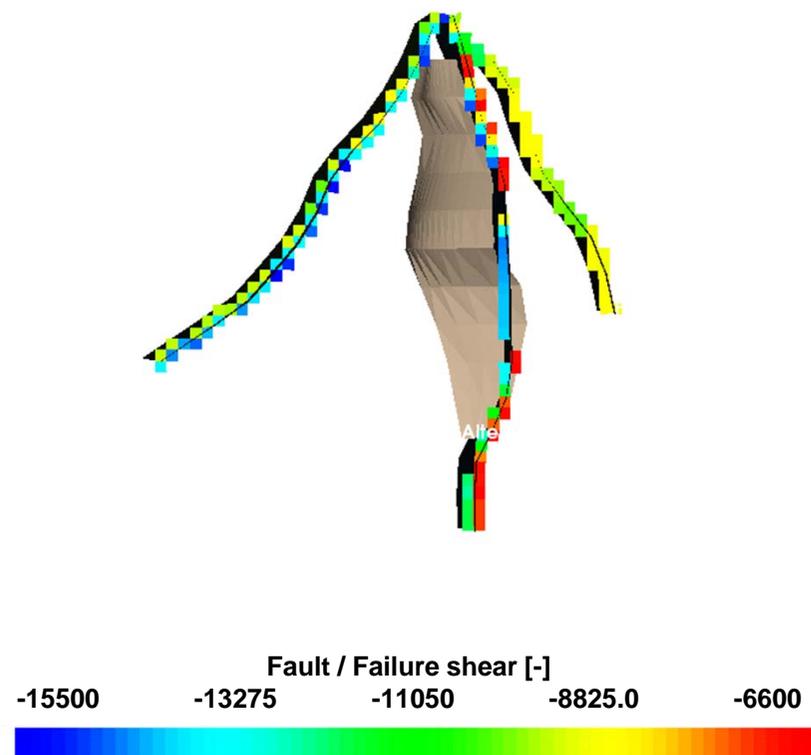


Figura 28 – Cap rock f.ne Montepagano: *failure* iniziali (a) e al termine della produzione primaria (b)



(a)



(b)

Figura 29 – Top f.ne Montepagano: *failure* per sforzo di taglio delle faglie, iniziali (a) e al termine della produzione primaria (b)

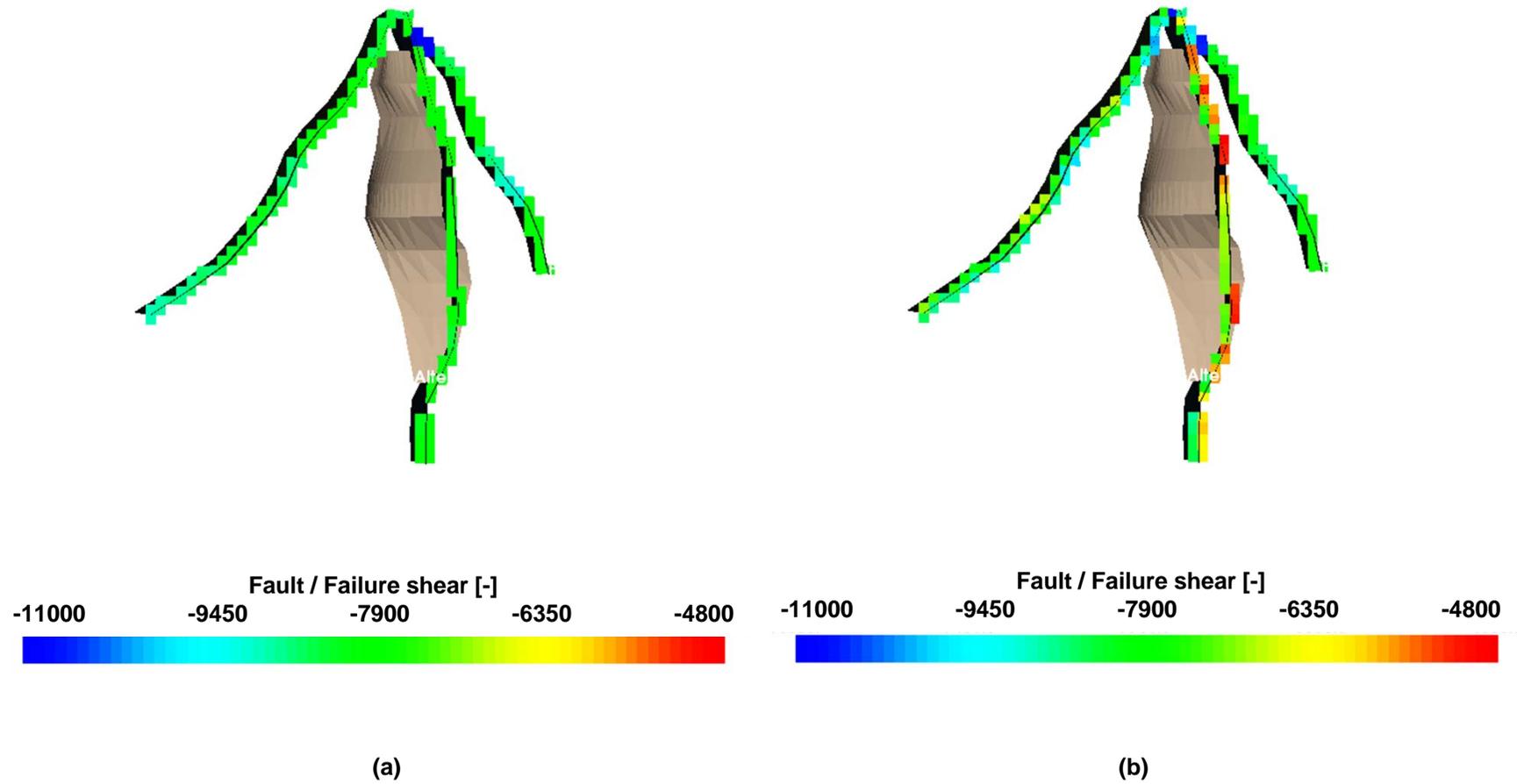


Figura 30 – Cap rock f.ne Montepagano: *failure* per sforzo di taglio delle faglie, iniziali (a) e al termine della produzione primaria (b)

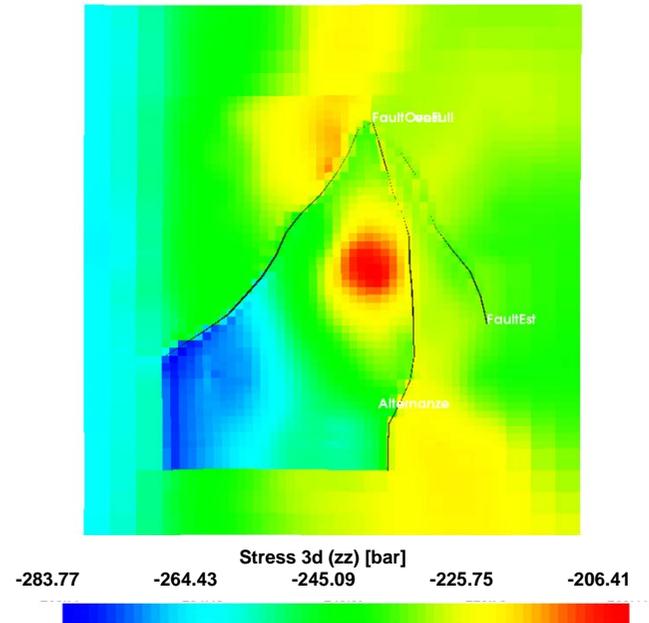
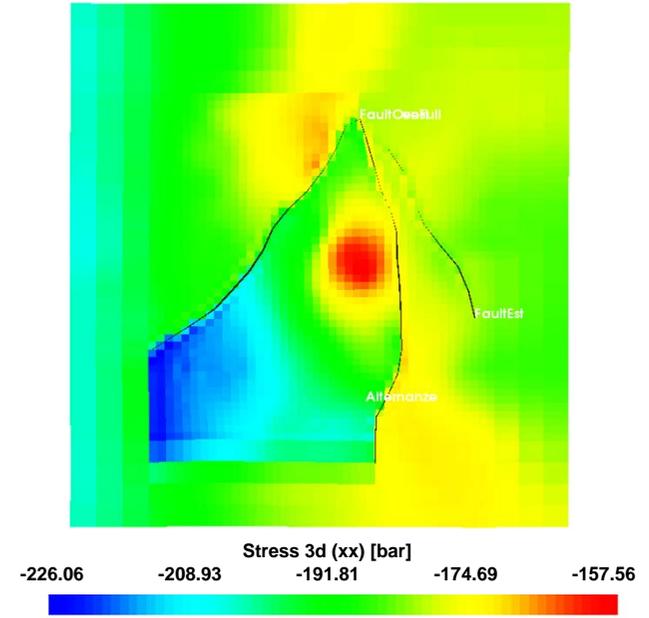
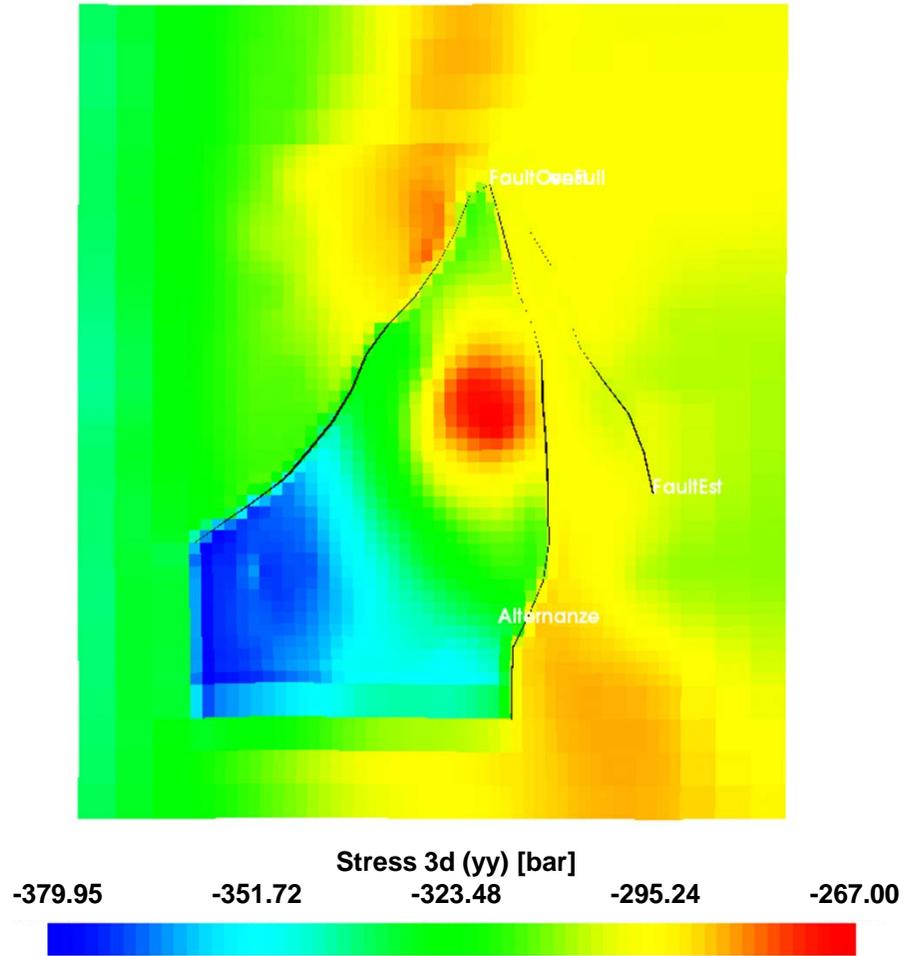


Figura 31 – Top f.ne Montepagano: tensioni efficaci verticali ed orizzontali alla fine della fase di ricostituzione

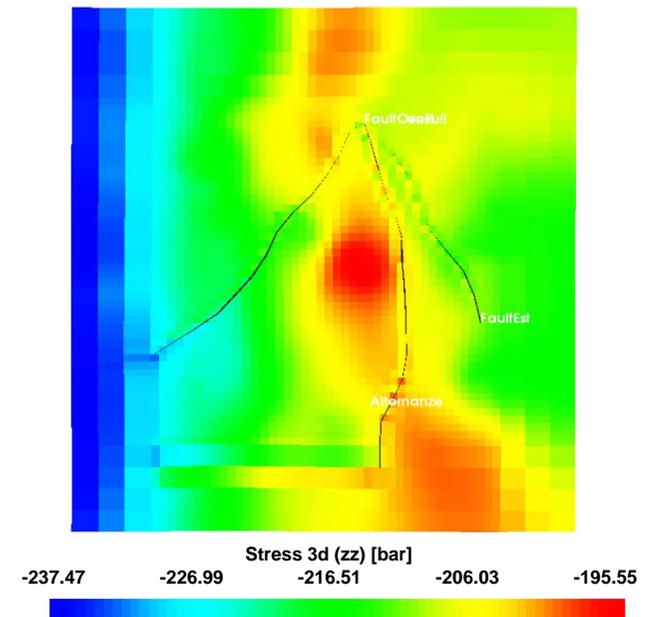
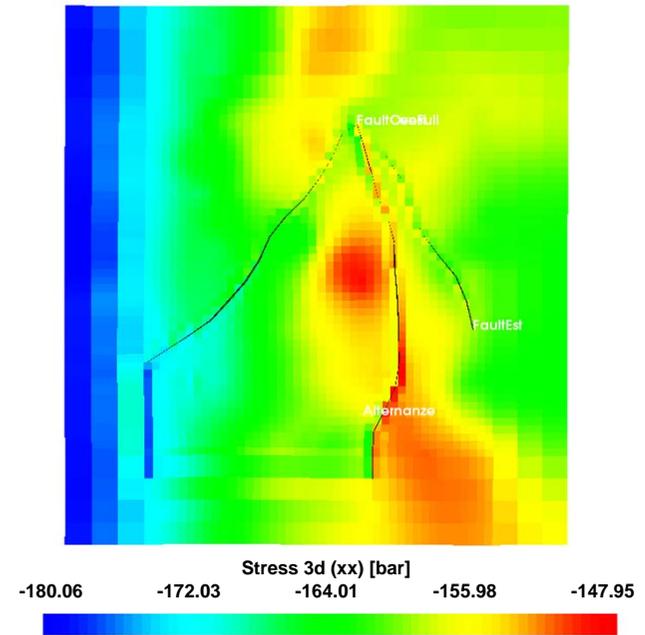
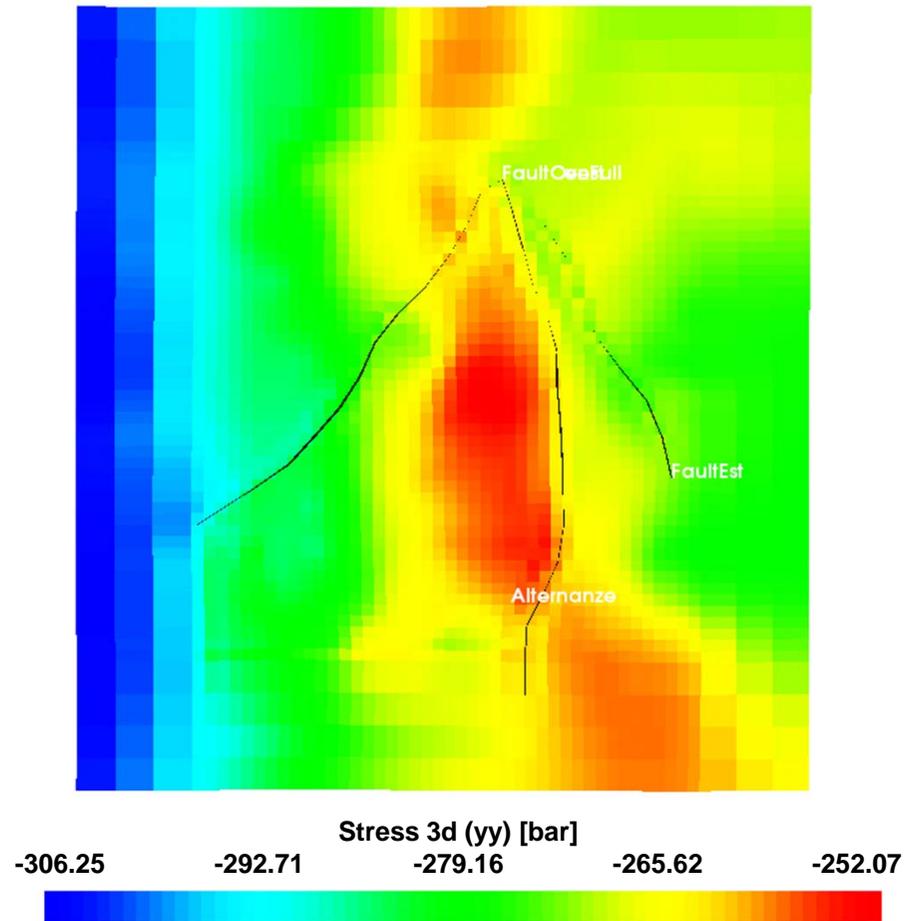
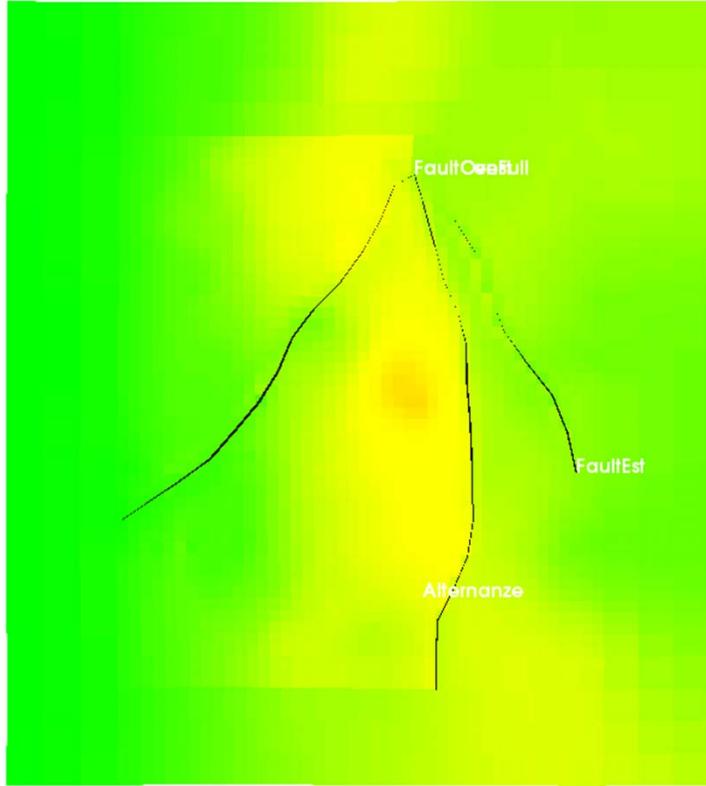
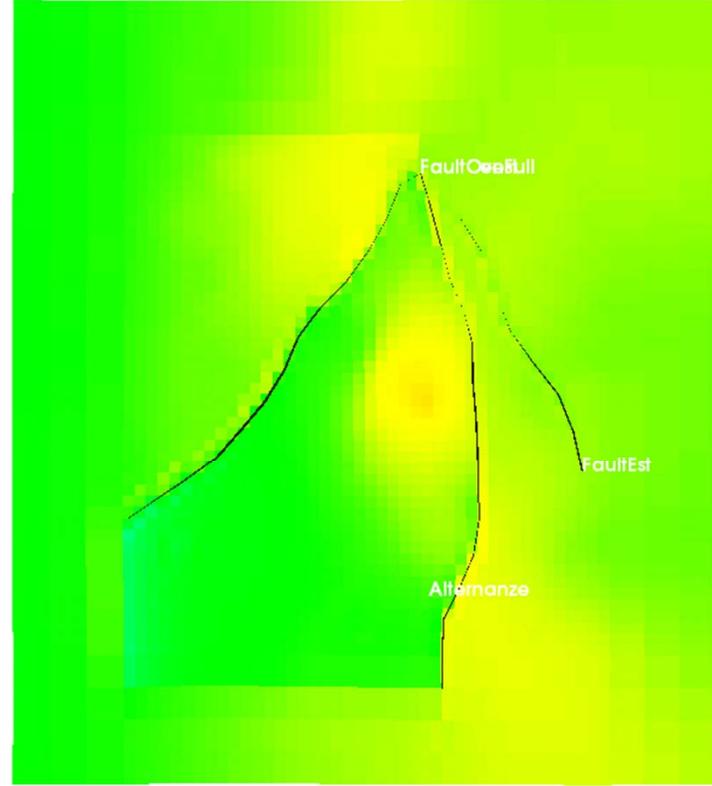


Figura 32 – Cap rock f.ne Montepagano: tensioni efficaci verticali ed orizzontali alla fine della fase di ricostituzione



(a)



(b)

Figura 33 – Top f.ne Montepagano: *failure* iniziali (a) e al termine della ricostituzione (b)

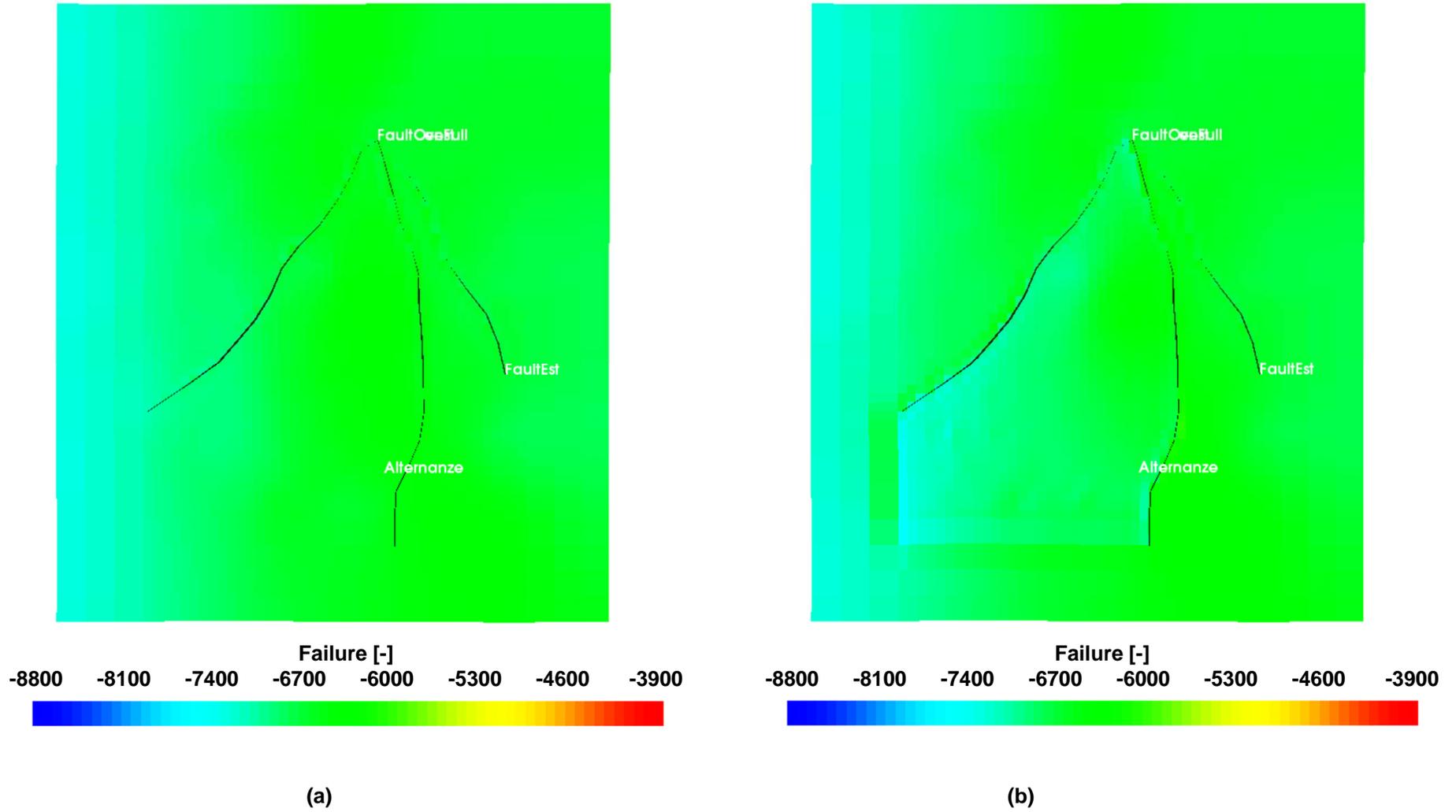


Figura 34 – *Cap rock* f.ne Montepagano: *failure* iniziali (a) e al termine della ricostituzione (b)

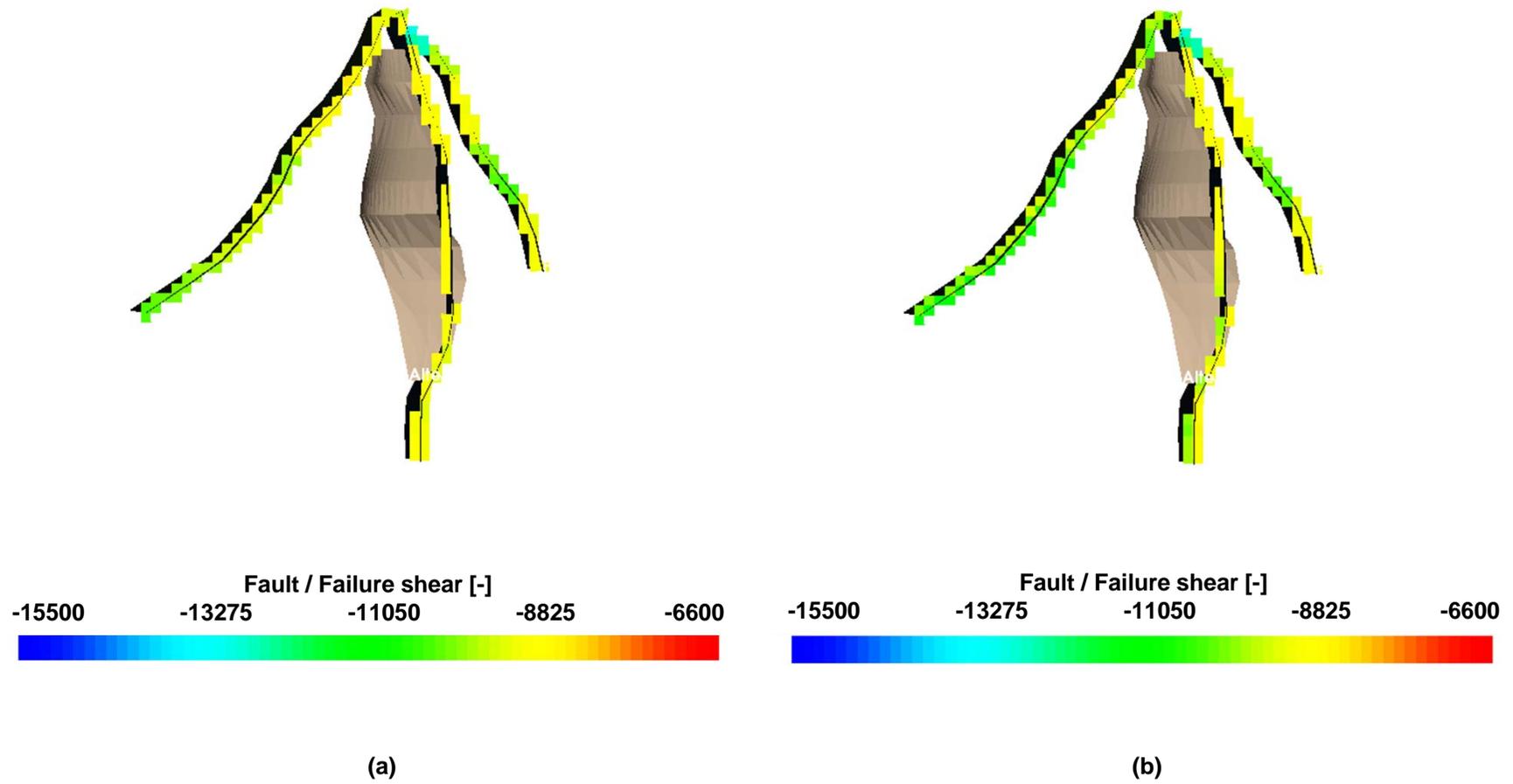


Figura 35 – Top f.ne Montepagano: *failure* per sforzo di taglio delle faglie, iniziali (a) e al termine della ricostituzione (b)

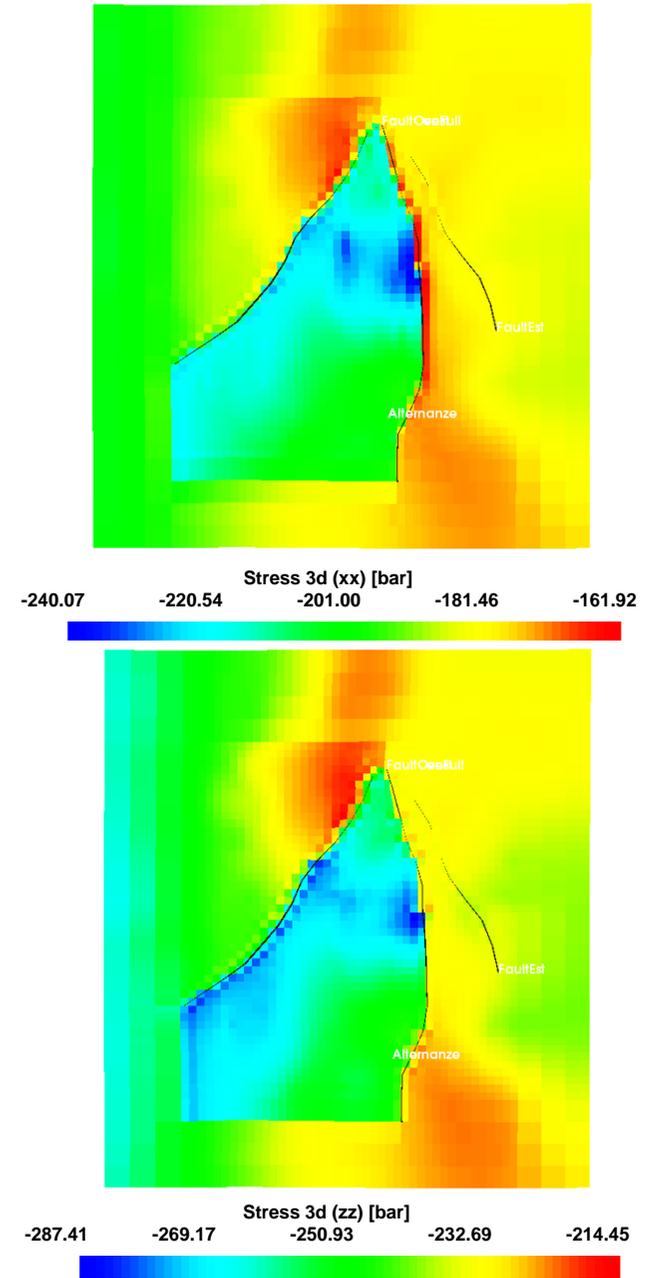
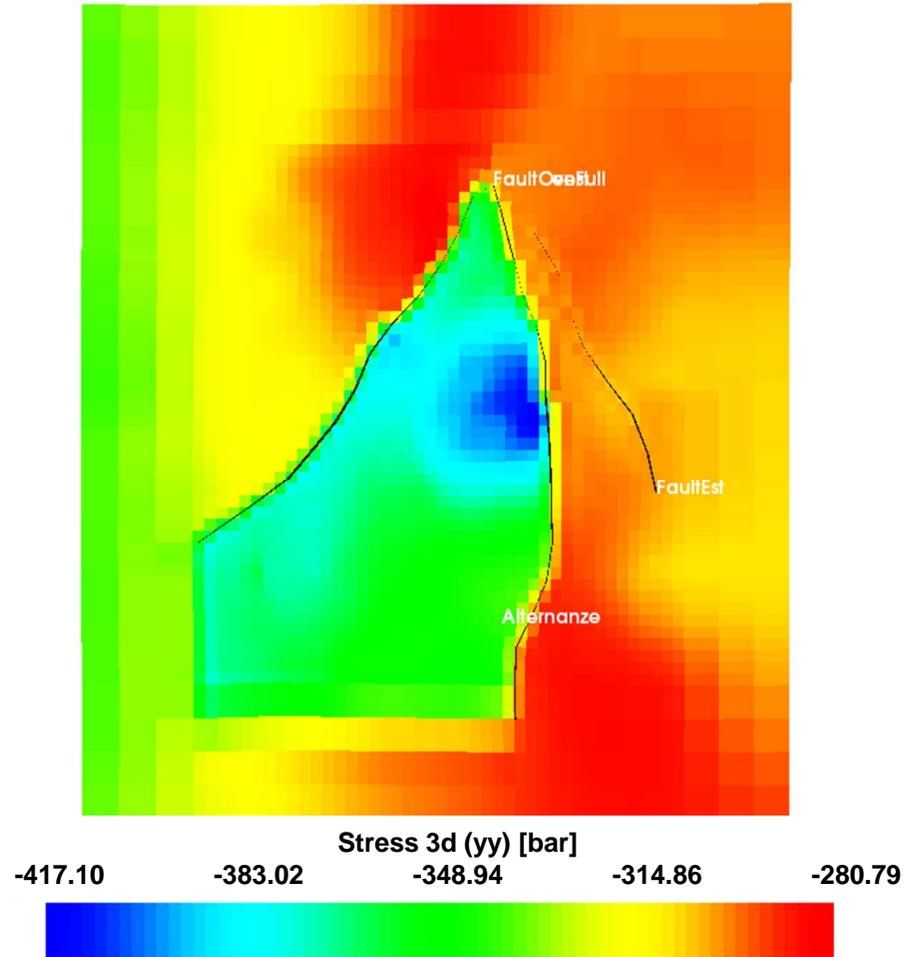


Figura 37 – Top f.ne Montepagano: tensioni efficaci alla fine del ciclo di produzione (THP_{min}=75 barsa)

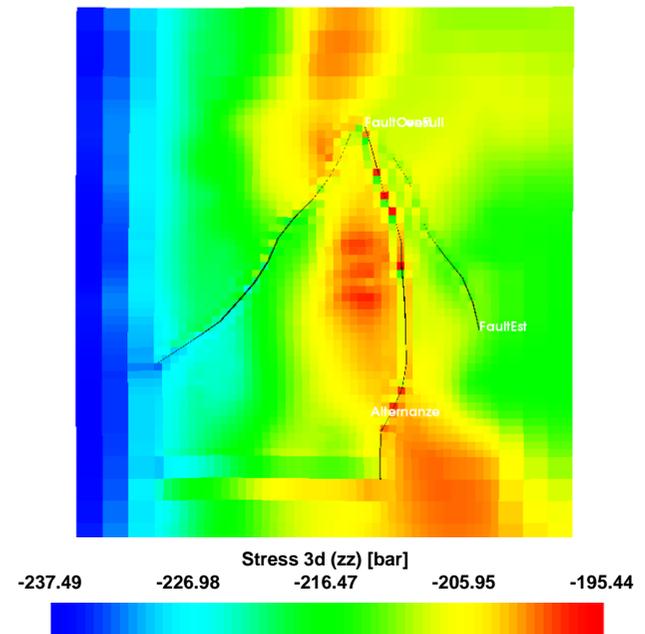
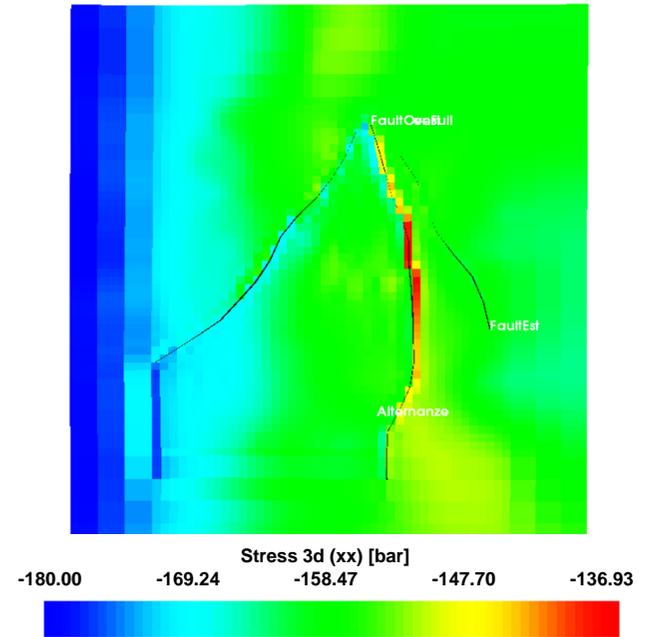
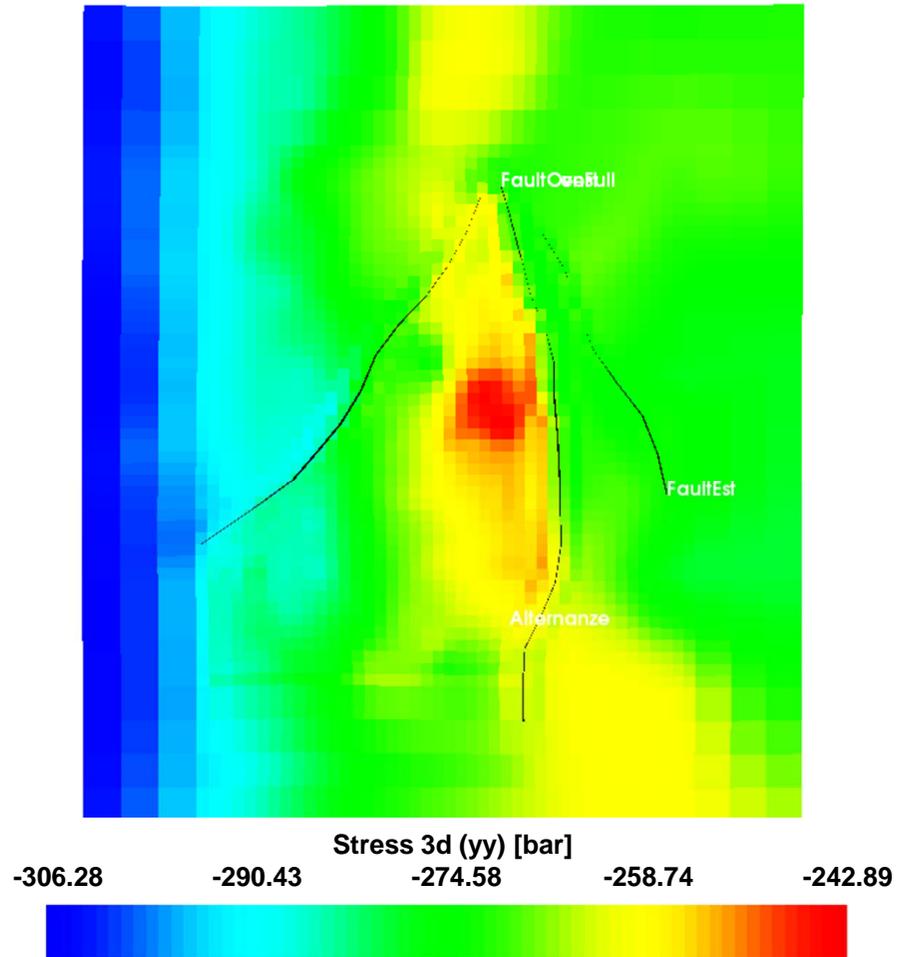
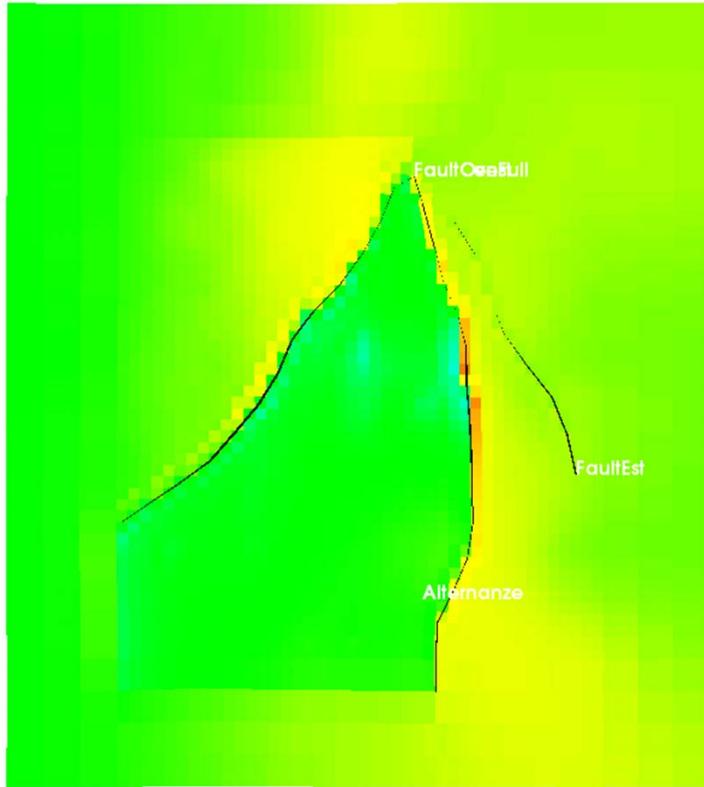
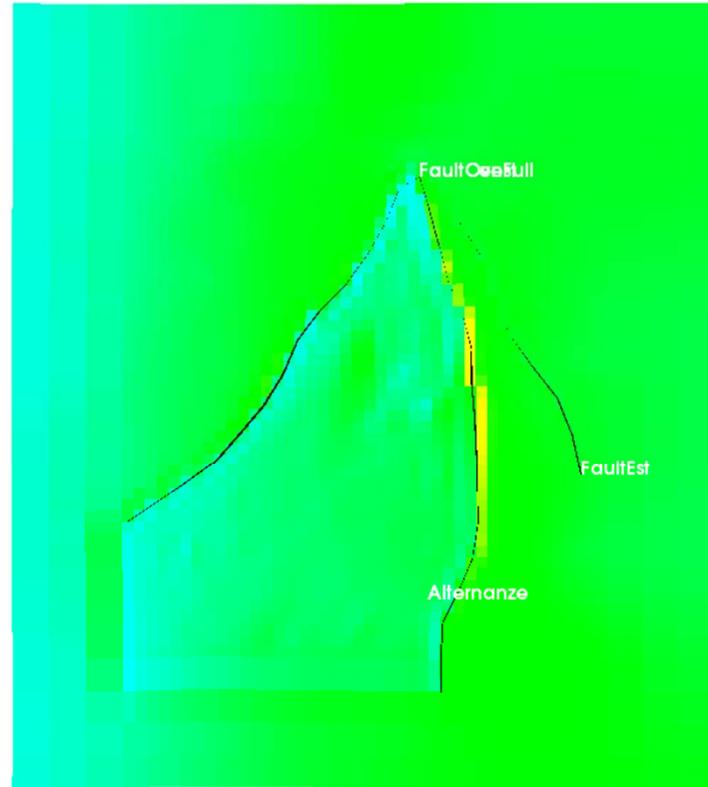


Figura 38 – *Cap rock* f.ne Montepagano: tensioni efficaci alla fine del ciclo di produzione ($THP_{min}=75$ barsa)

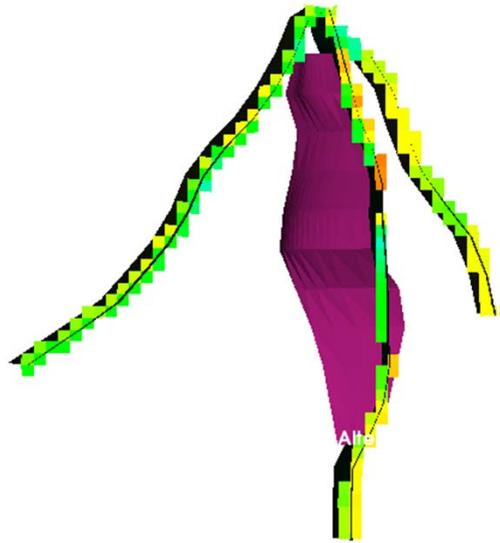


(a)

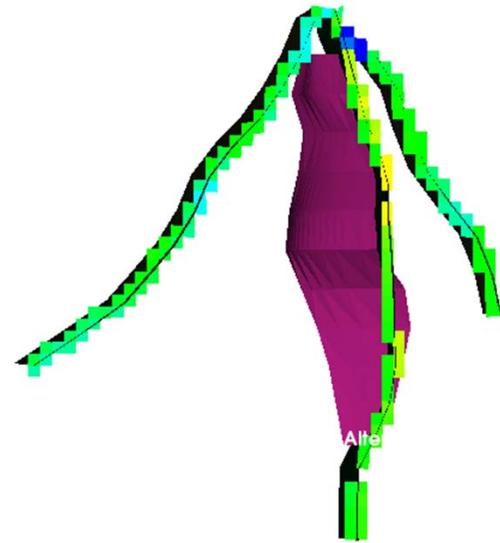


(b)

Figura 39 – F.ne Montepagano: *failure* al termine di un ciclo di produzione a $THP_{min}=75$ barsa in giacimento (a) e nella cap rock (b)



(a)



(b)

Figura 40 – F.ne Montepagano: *failure* per sforzo di taglio delle faglie, al termine di un ciclo di produzione a $THP_{min}=75$ barsa, in giacimento (a) e nella *cap rock* (b)

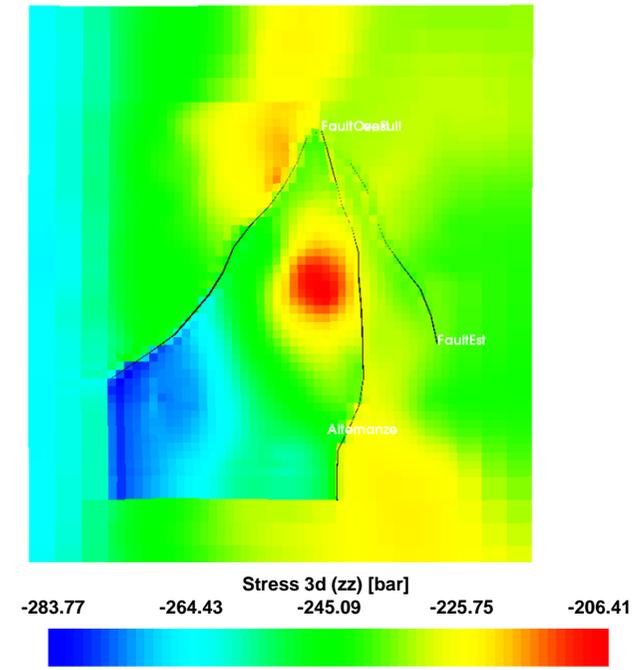
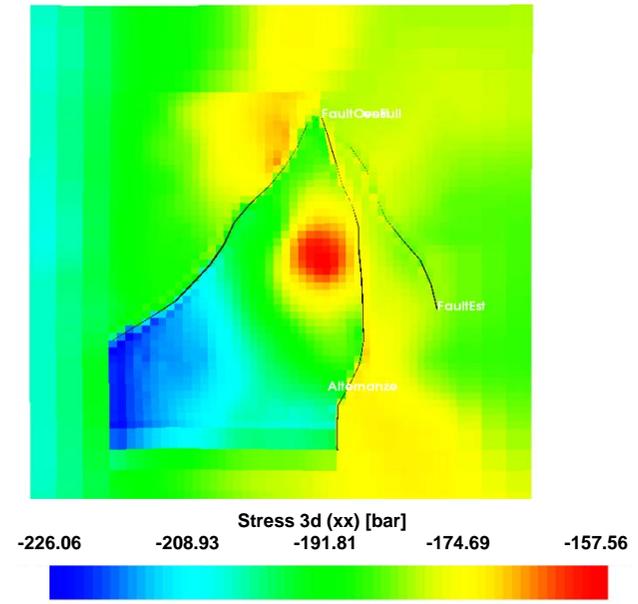
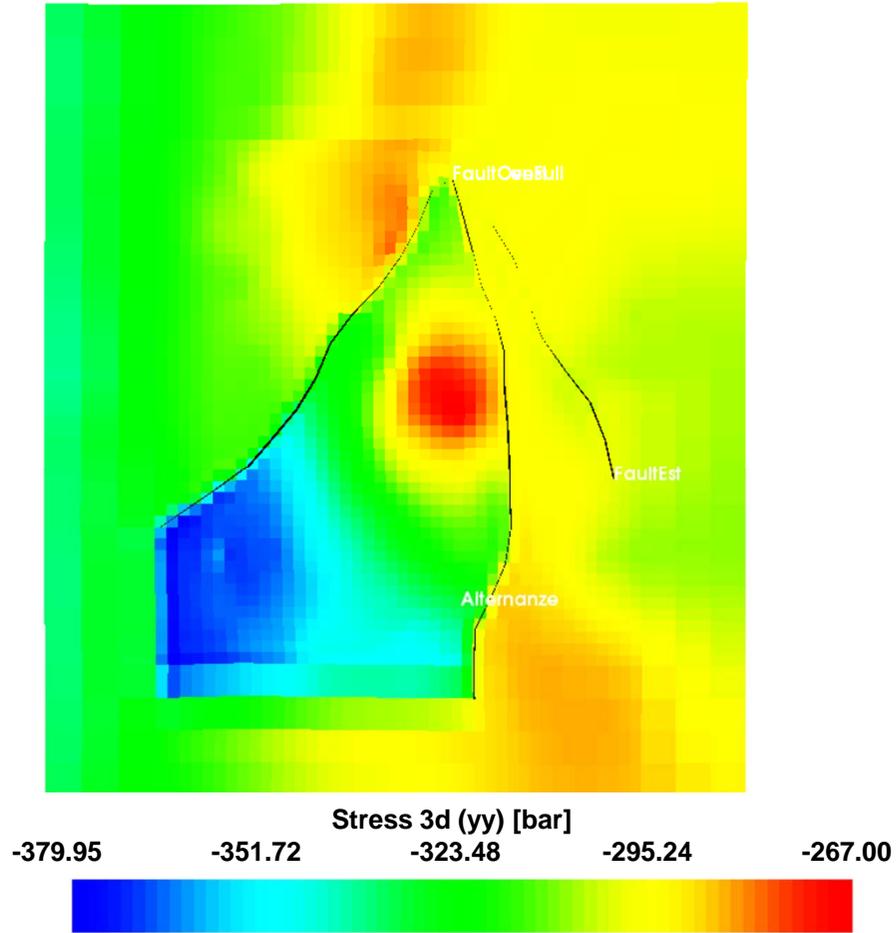


Figura 41 – Top f.ne Montepagano: tensioni efficaci alla fine del ciclo di iniezione ($p=\pi$)

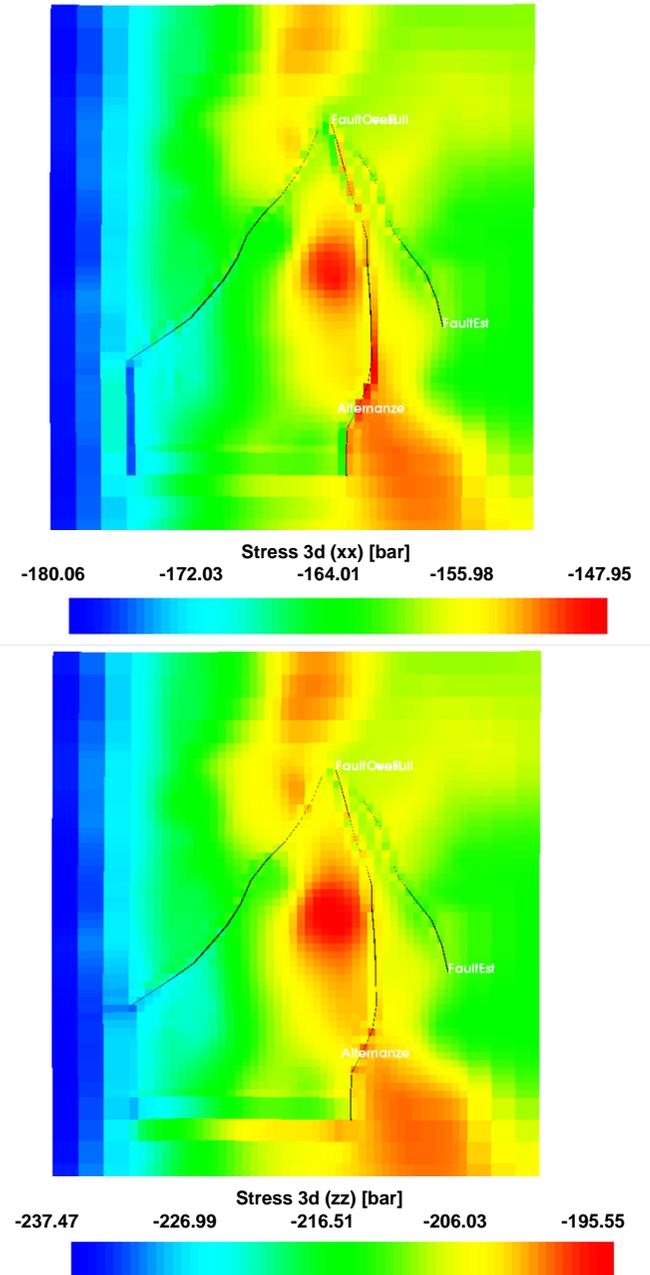
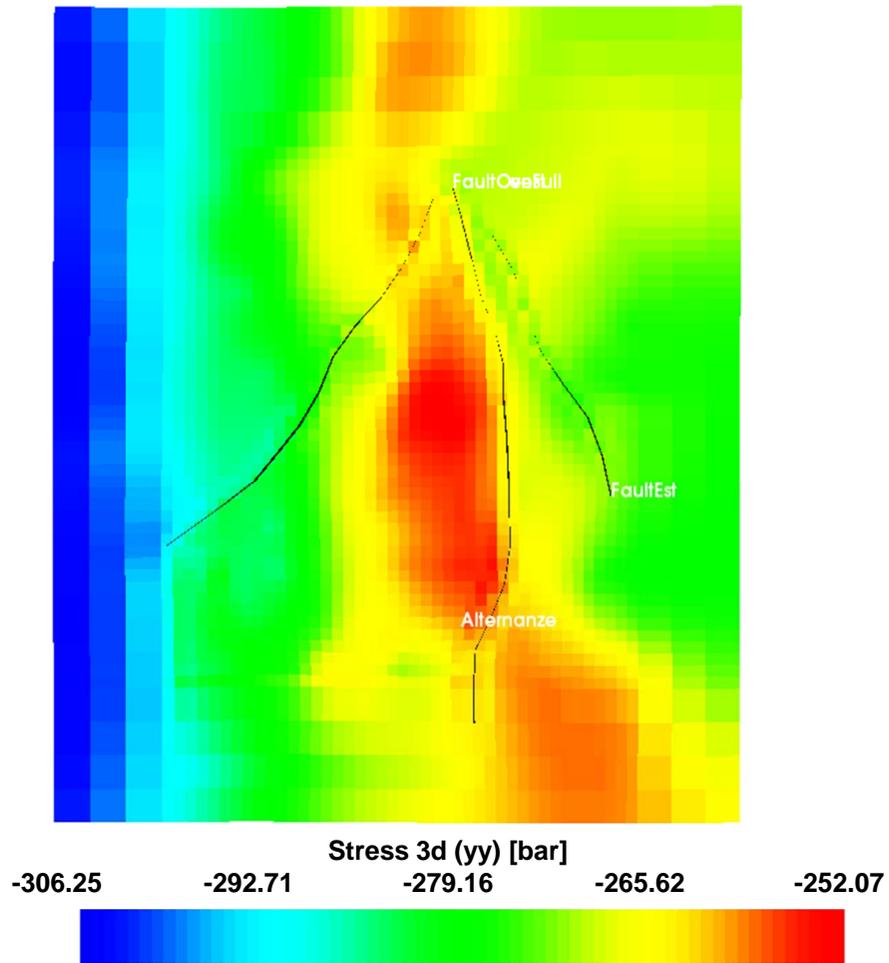
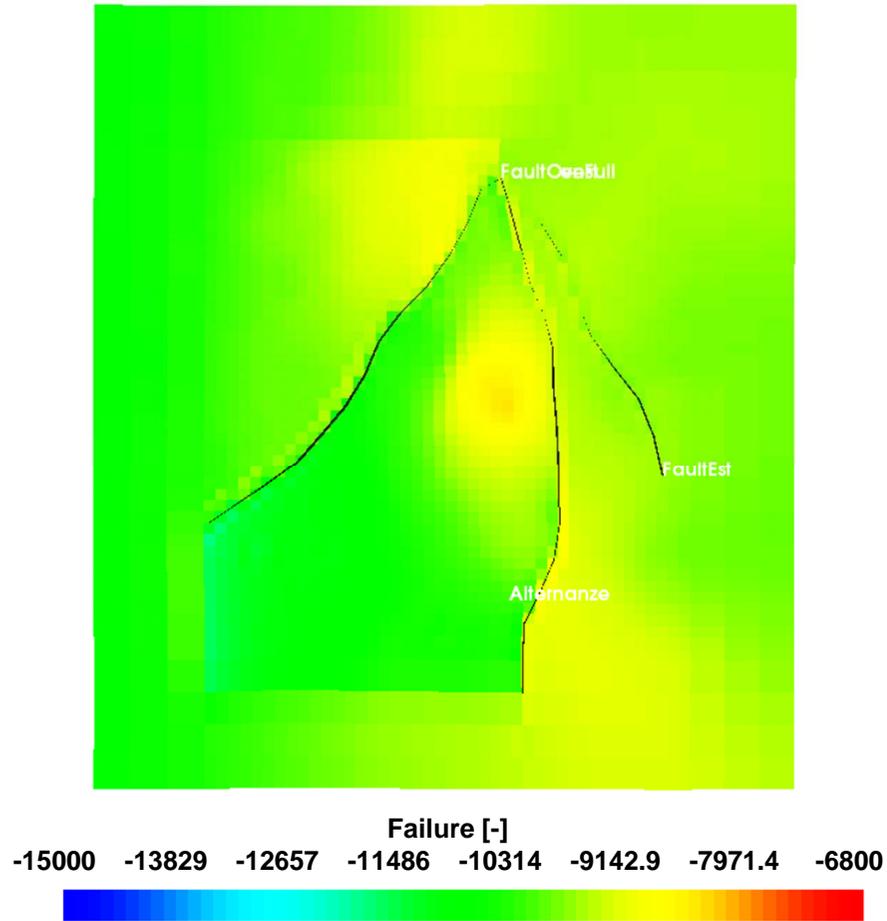
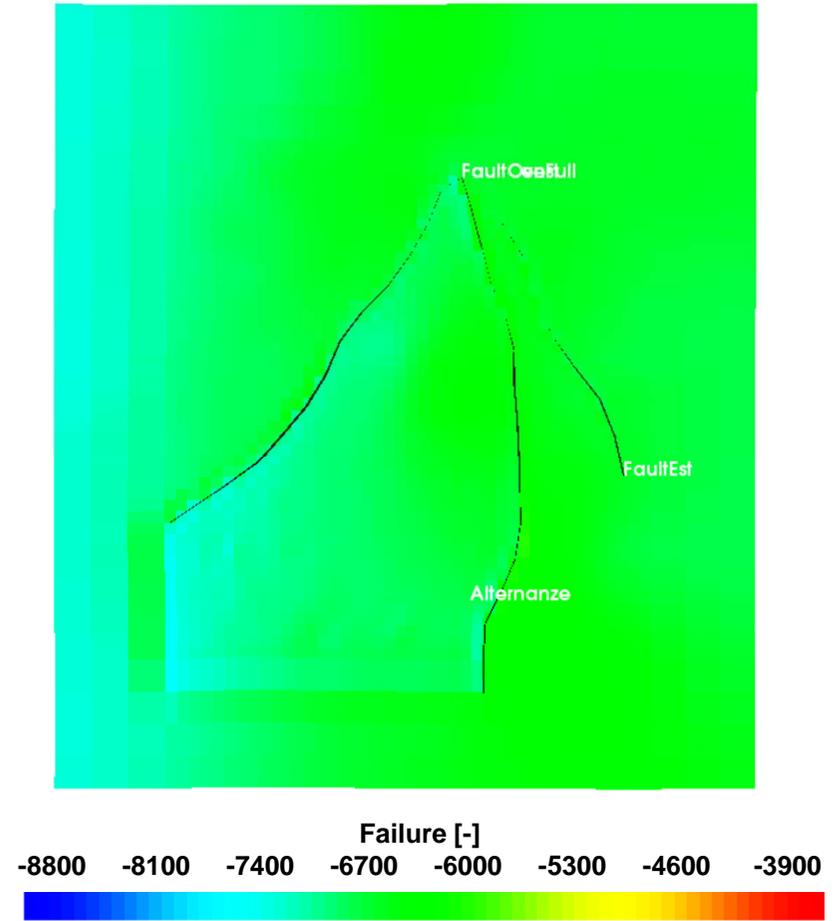


Figura 42 – Cap rock f.ne Montepagano: tensioni efficaci alla fine del ciclo di iniezione ($p=p_i$)

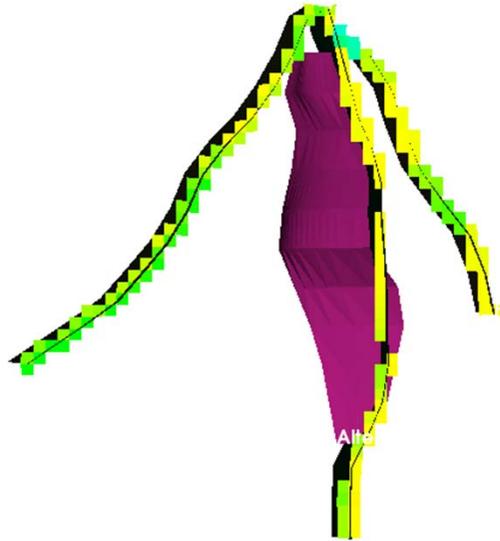


(a)

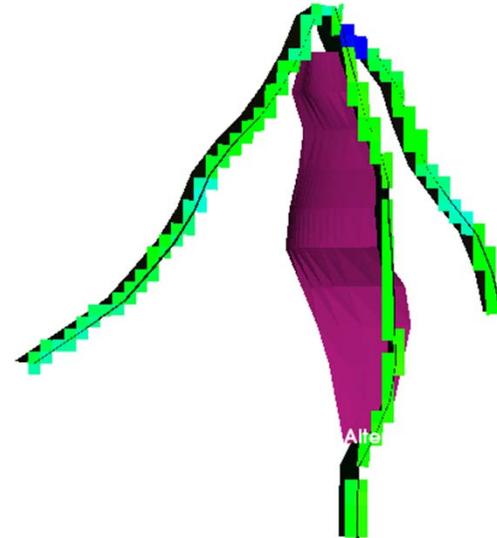


(b)

Figura 43 – F.ne Montepagano: *failure* al termine di un ciclo di iniezione ($p=p_i$), in giacimento (a) e nella cap rock (b)



(a)



(b)

Figura 44 – F.ne Montepagano: *failure* per sforzo di taglio delle faglie, al termine di un ciclo iniezione ($p=p_i$), in giacimento (a) e nella cap rock (b)

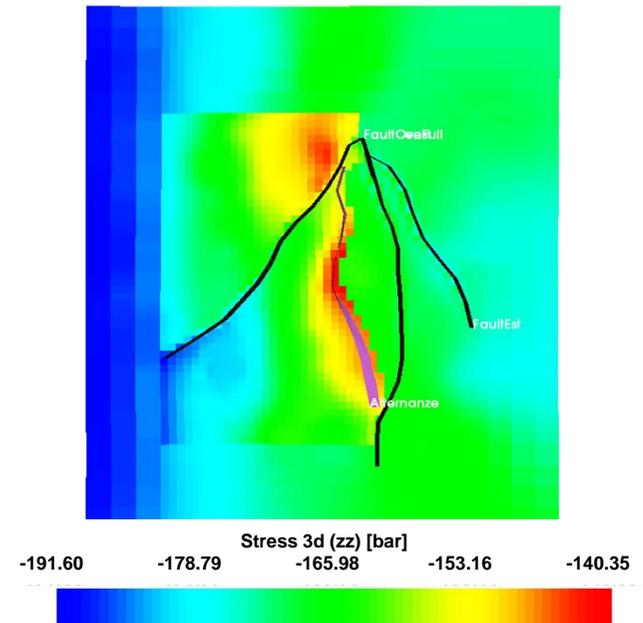
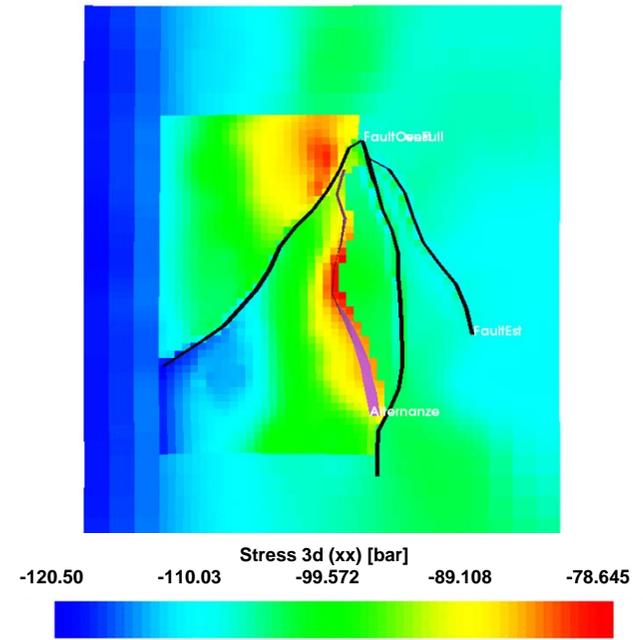
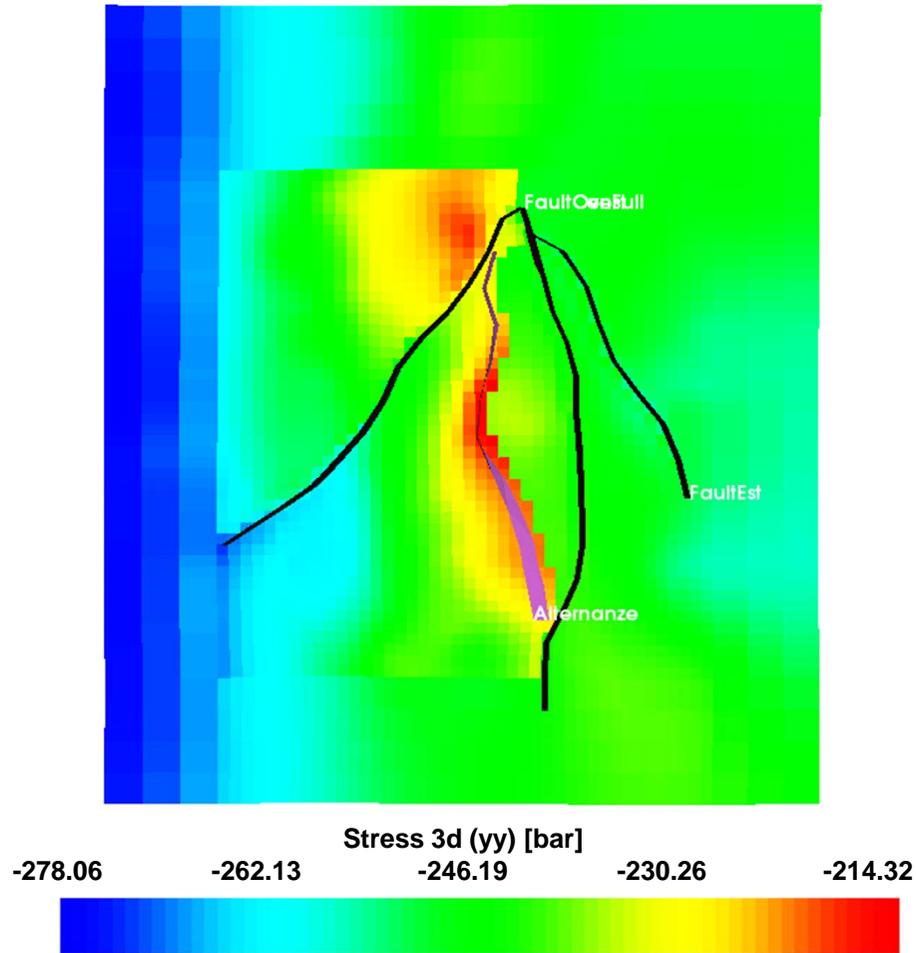


Figura 45 – F.ne Alternanze, livello SB4: tensioni efficaci iniziali verticali ed orizzontali

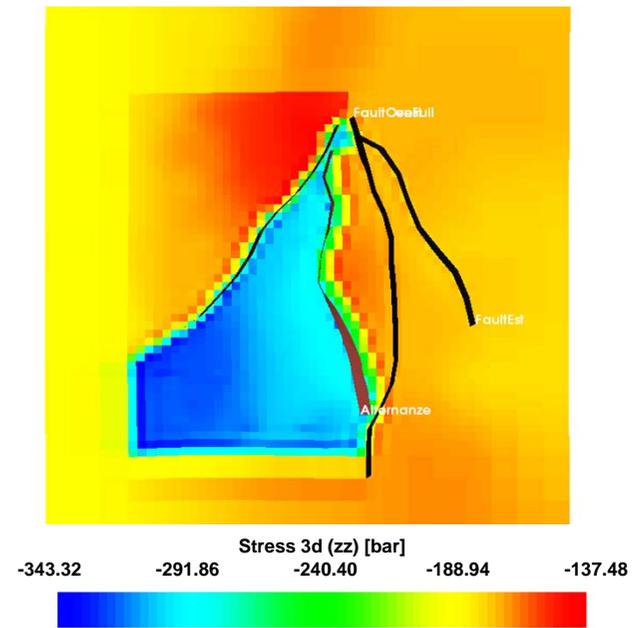
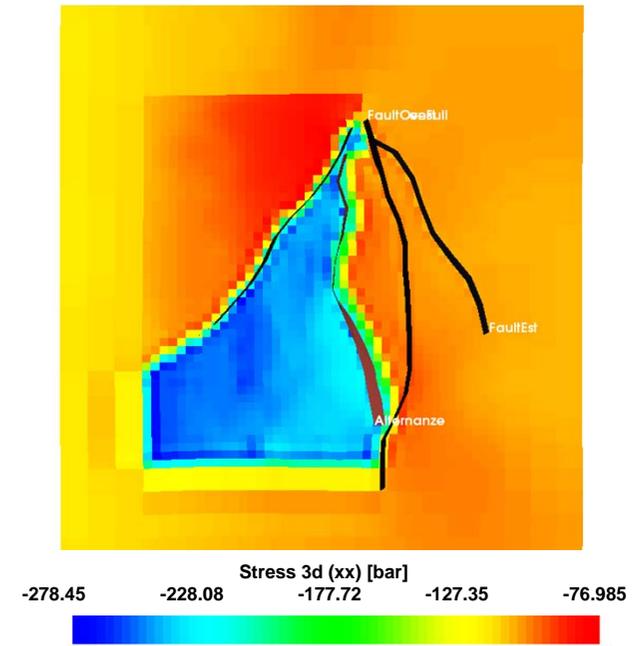
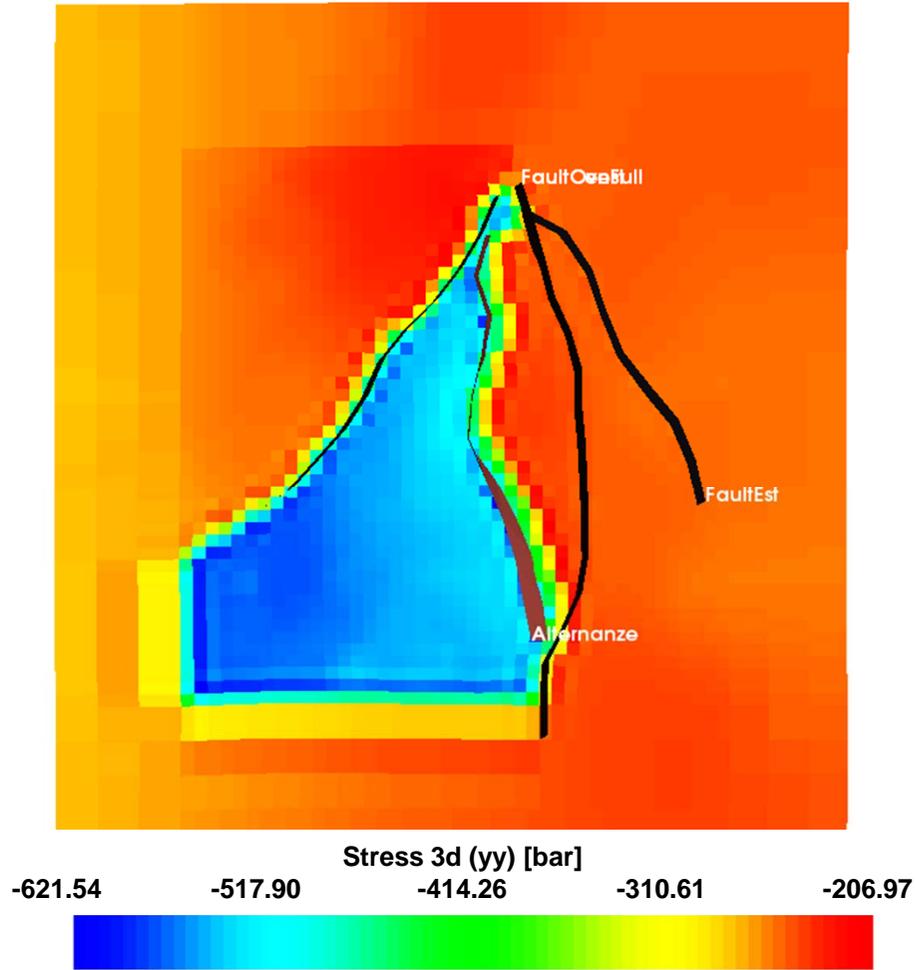


Figura 46 – F.ne Alternanze, livello SB4: tensioni efficaci verticali ed orizzontali alla fine della produzione primaria

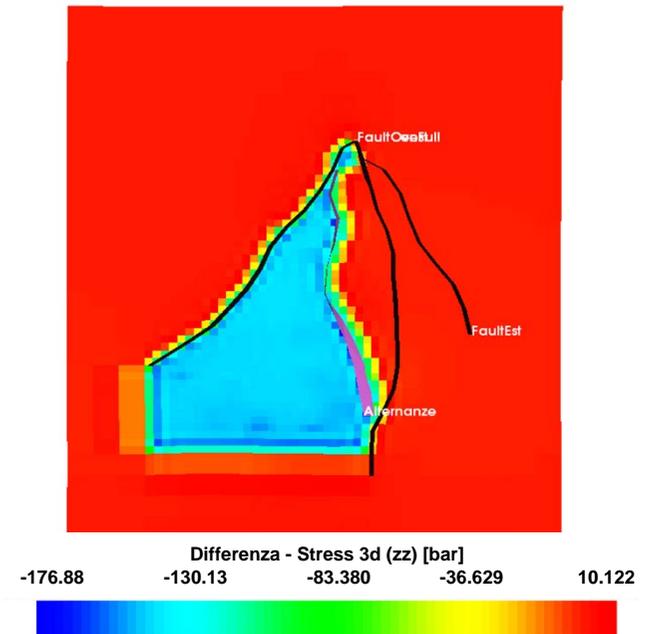
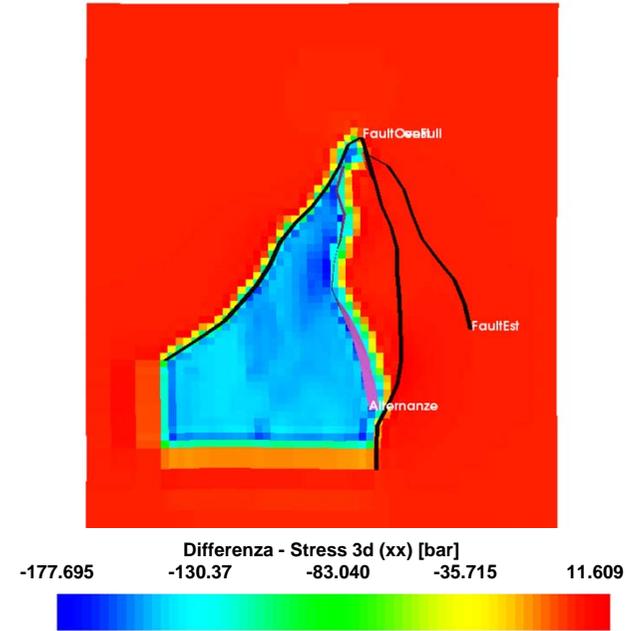
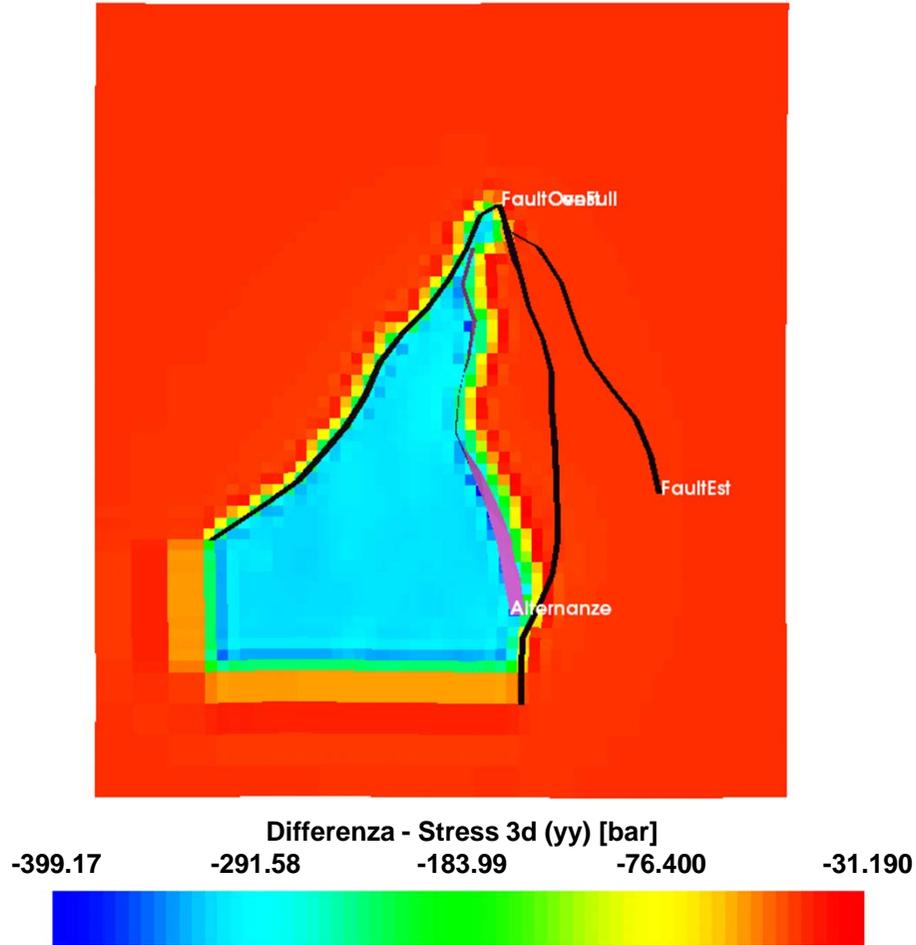


Figura 47 – F.ne Alternanze, livello SB4: differenza tra le tensioni efficaci al termine della produzione primaria rispetto al valore iniziale

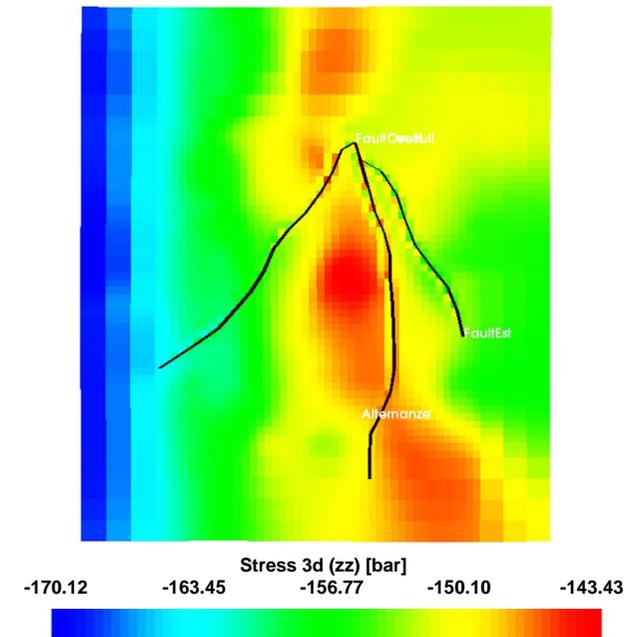
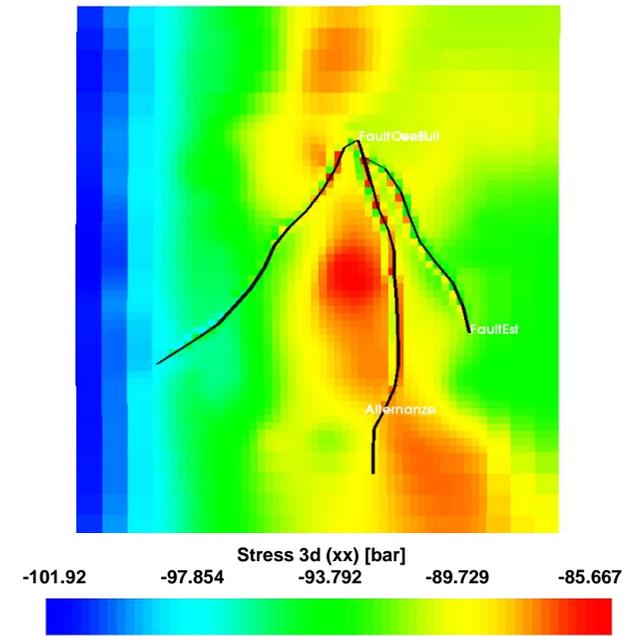
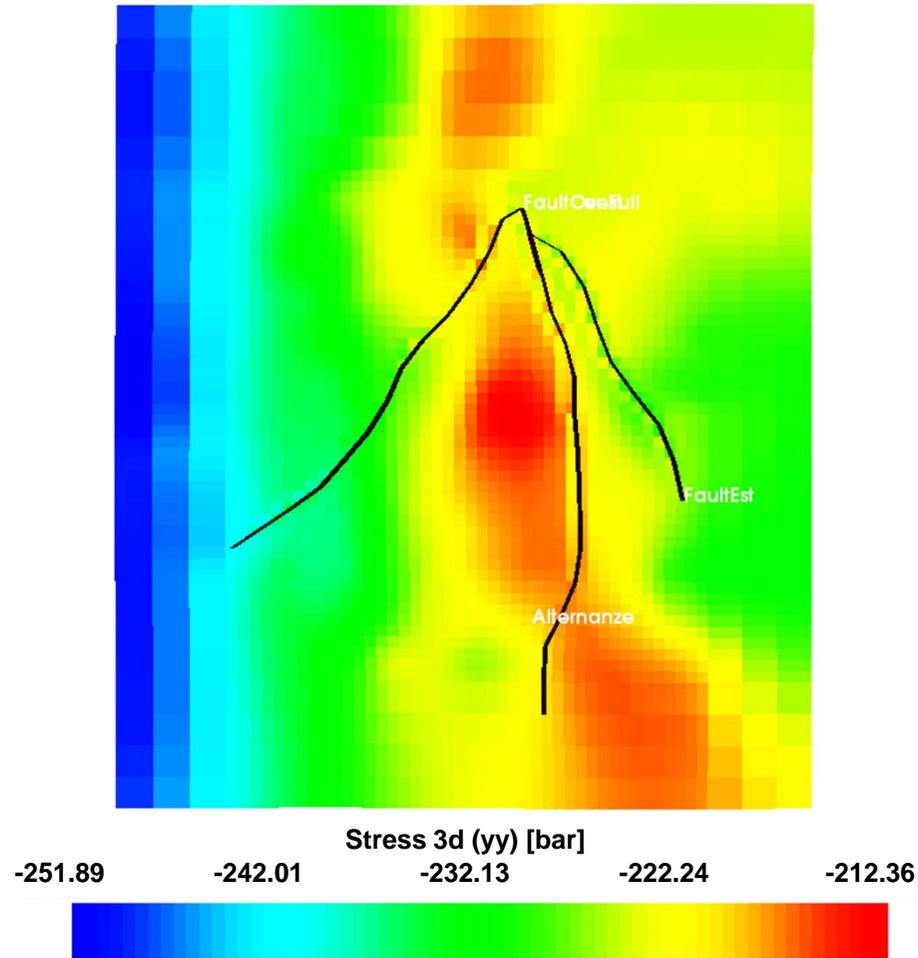


Figura 48 – Cap rock f.ne Alternanze: tensioni efficaci iniziali verticali ed orizzontali

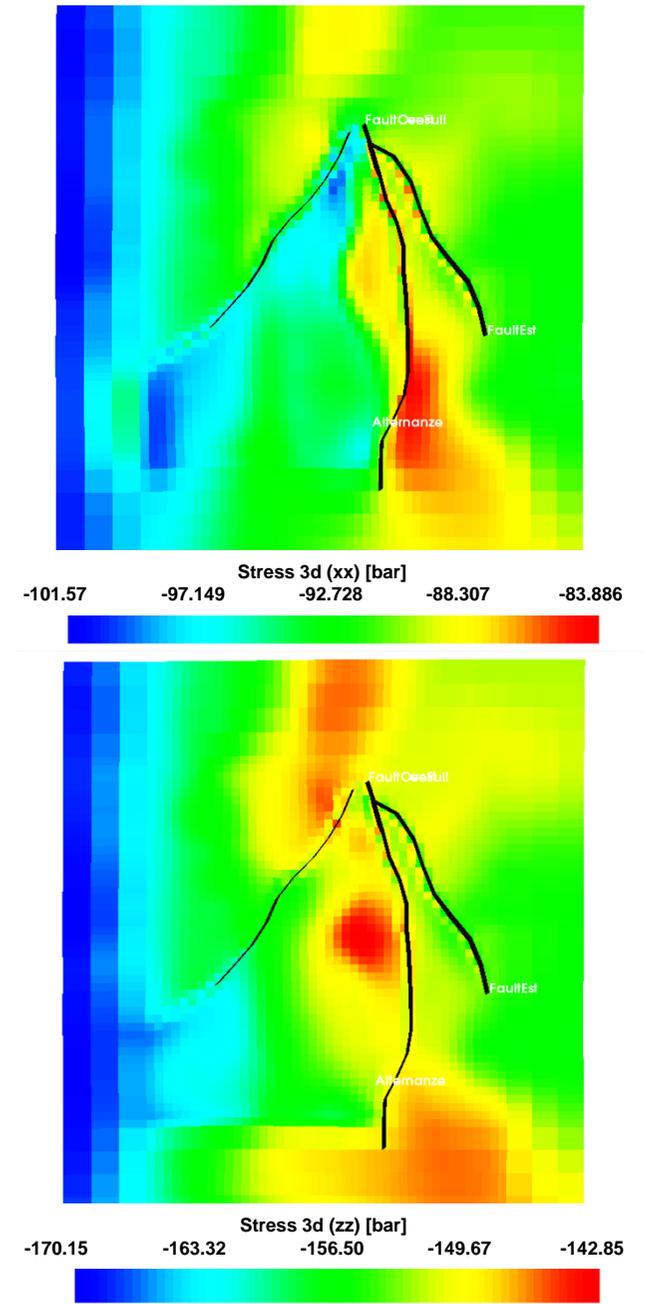
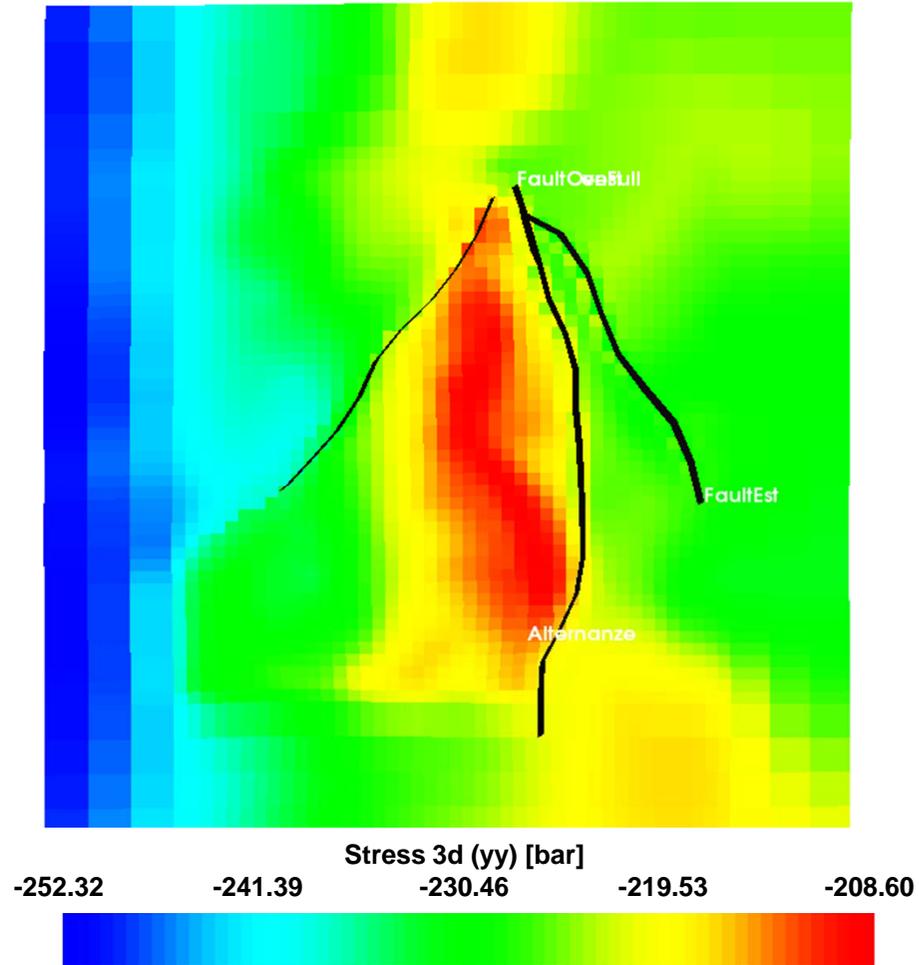


Figura 49 – Cap rock f.ne Alternanze: tensioni efficaci verticali ed orizzontali alla fine della produzione primaria

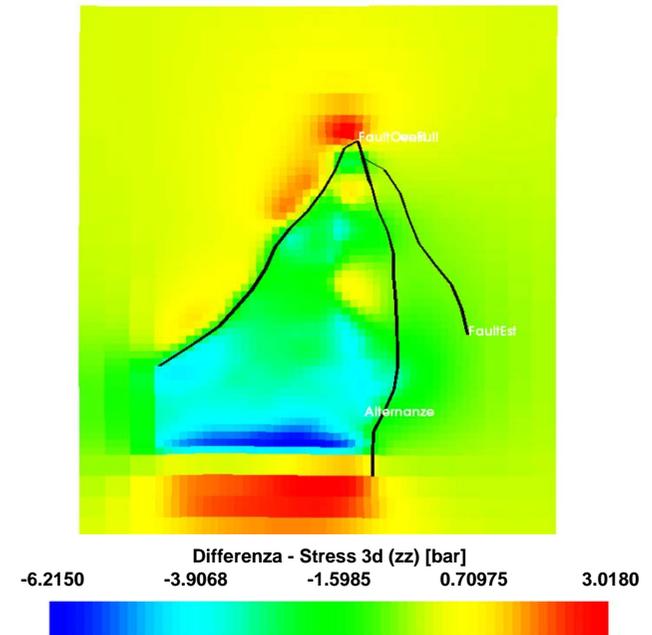
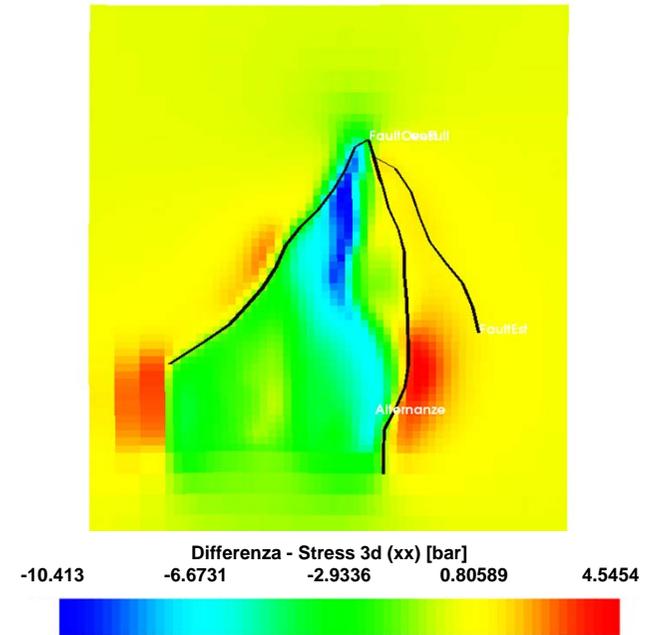
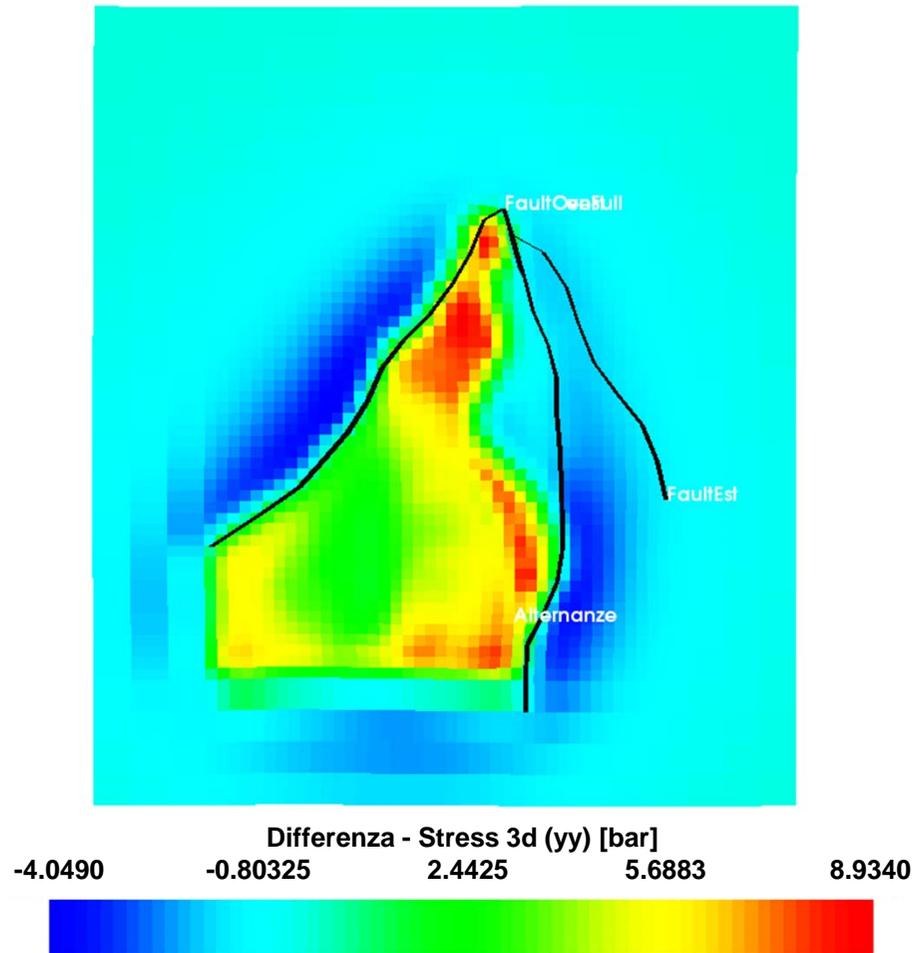
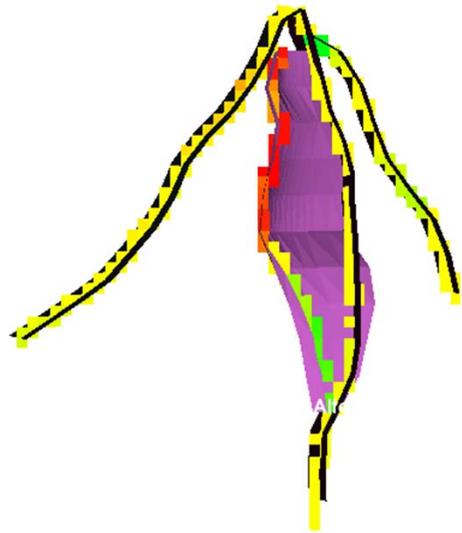


Figura 50 – Cap rock f.ne Alternanze: differenza tra le tensioni verticali efficaci al termine della produzione primaria rispetto al valore iniziale

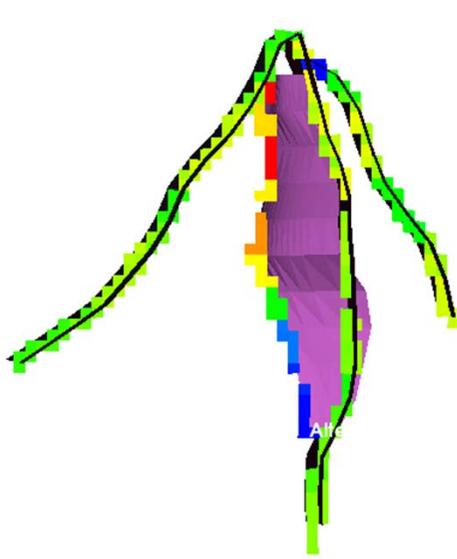


(a)

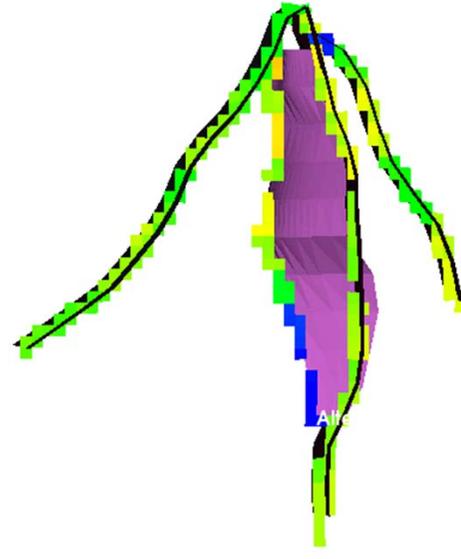


(b)

Figura 51 – F.ne Alternanze, livello SB4: *failure* per sforzo di taglio delle faglie, iniziali (a) e al termine della produzione primaria (b)



(a)



(b)

Figura 52 – Cap rock f.ne Alternanze: *failure* per sforzo di taglio delle faglie, iniziali (a) e al termine della produzione primaria (b)



Caso statico

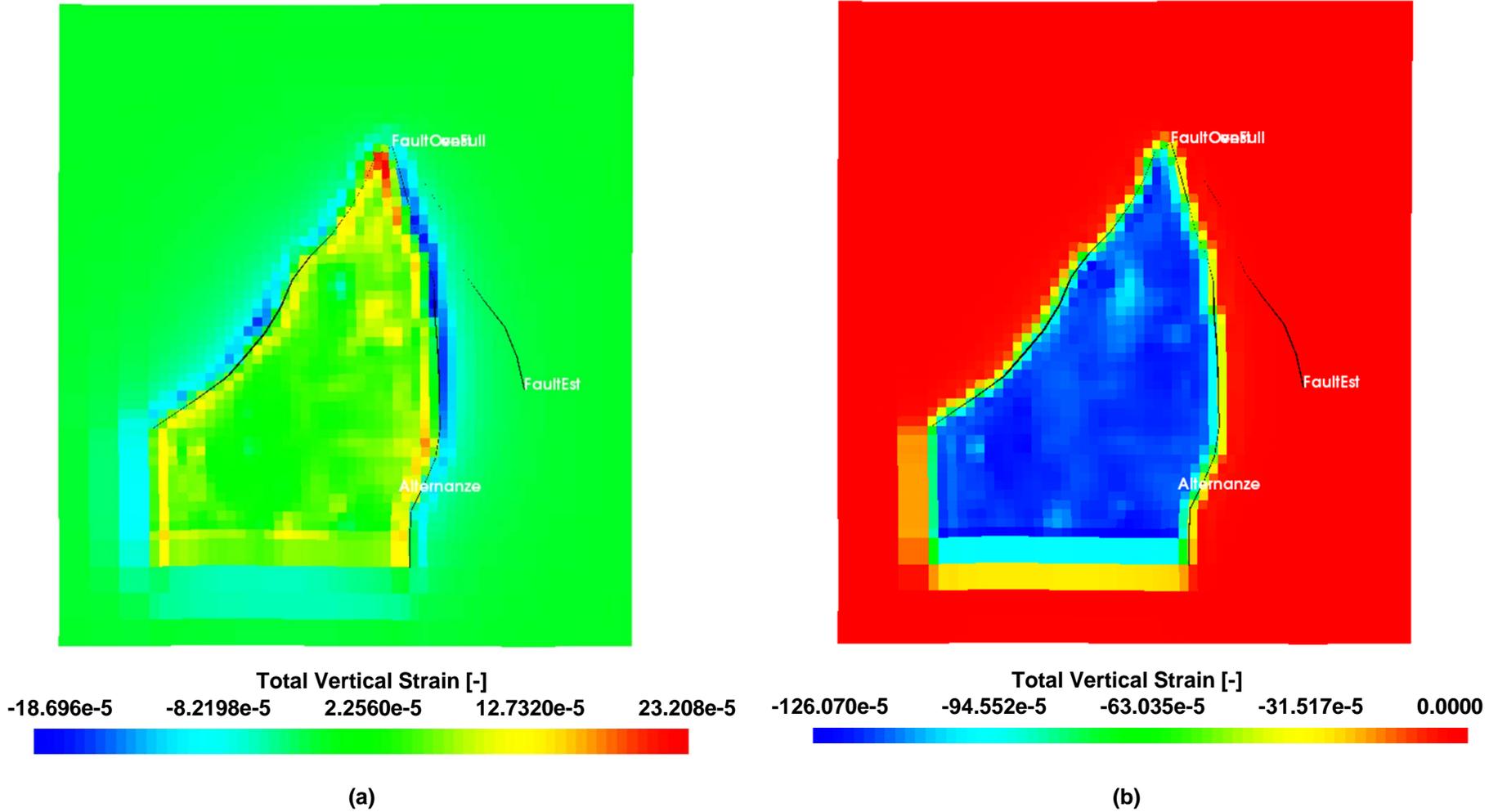


Figura 53 – F.ne Montepagano: deformazioni verticali nella *cap rock* (a) e al top del giacimento (b) al termine della produzione primaria



Caso statico

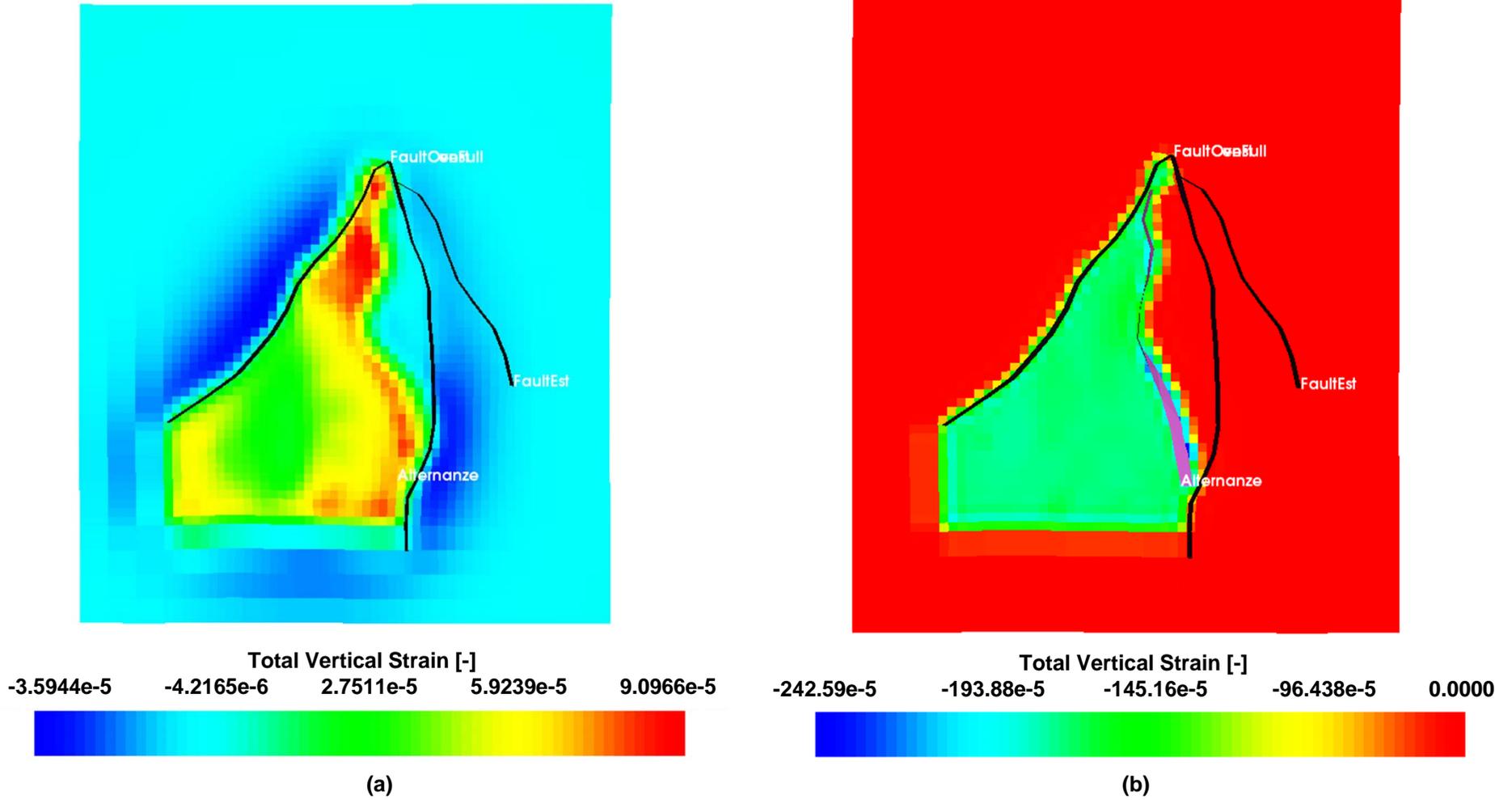


Figura 54 – F.ne Alternanze: deformazioni verticali nella *cap rock* (a) e nel livello SB4 (b) al termine della produzione primaria



Caso statico

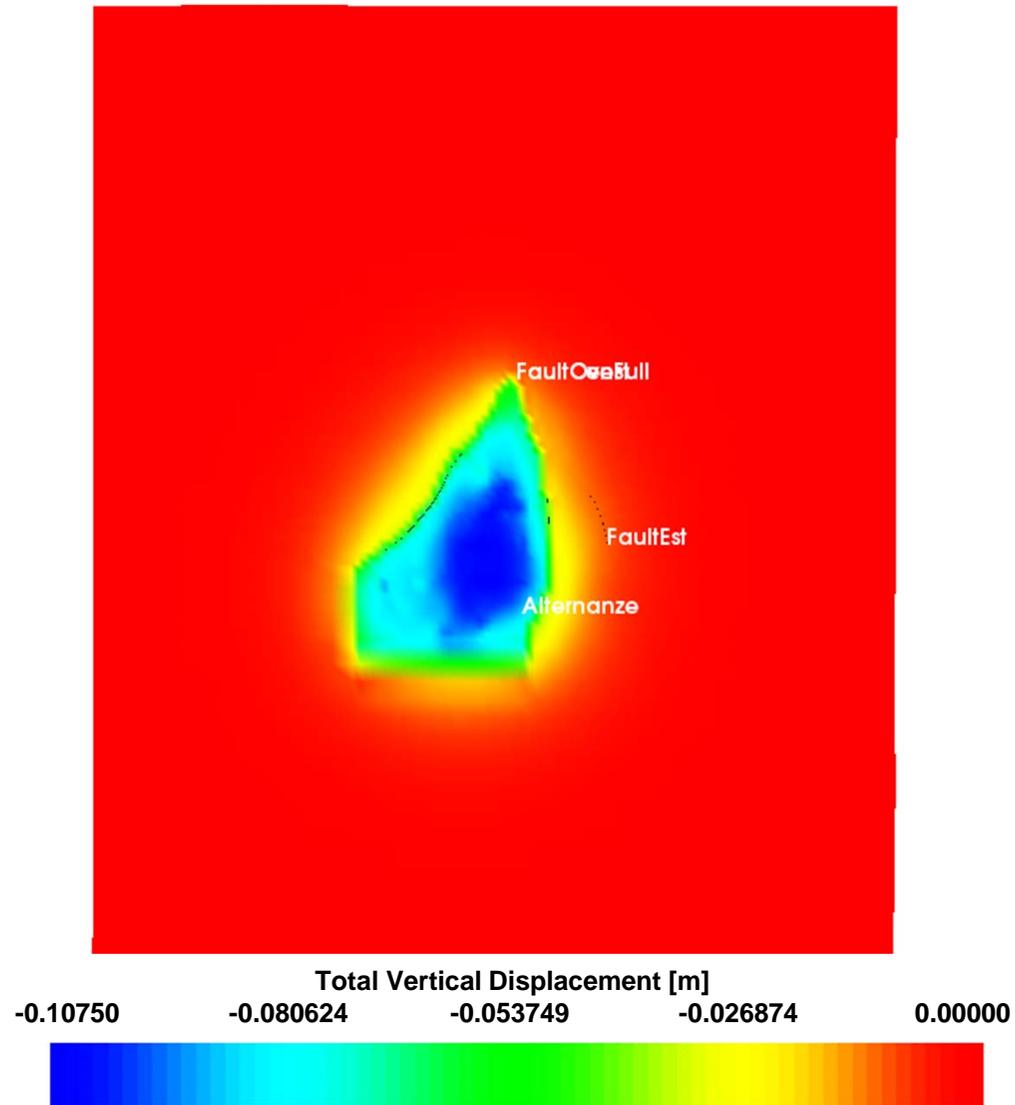


Figura 55 – F.ne Montepagano: spostamenti verticali al top del giacimento alla fine della produzione primaria



Caso statico

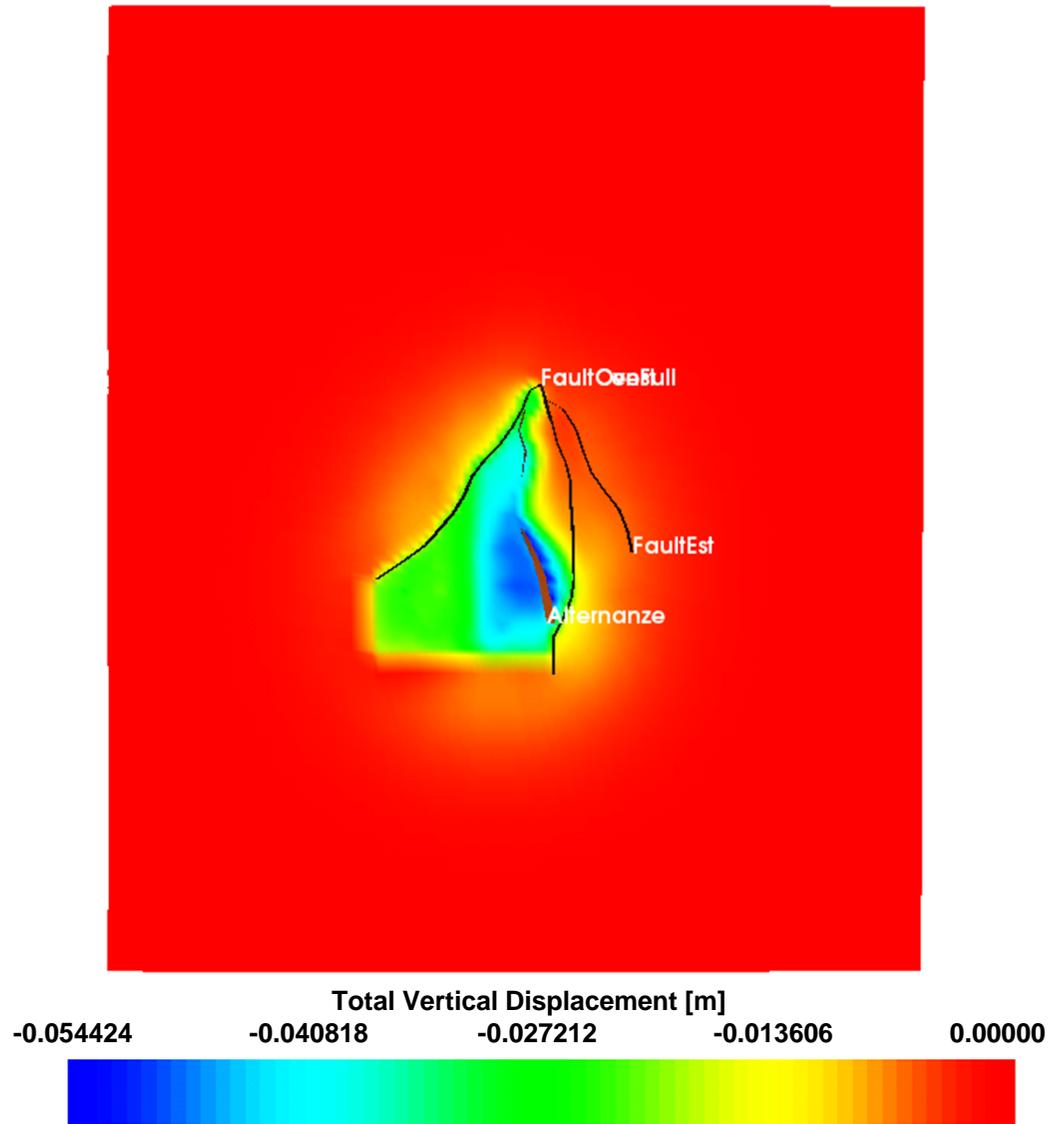


Figura 56 – F.ne Alternanze: spostamenti verticali nel livello SB4 alla fine della produzione primaria



Caso statico

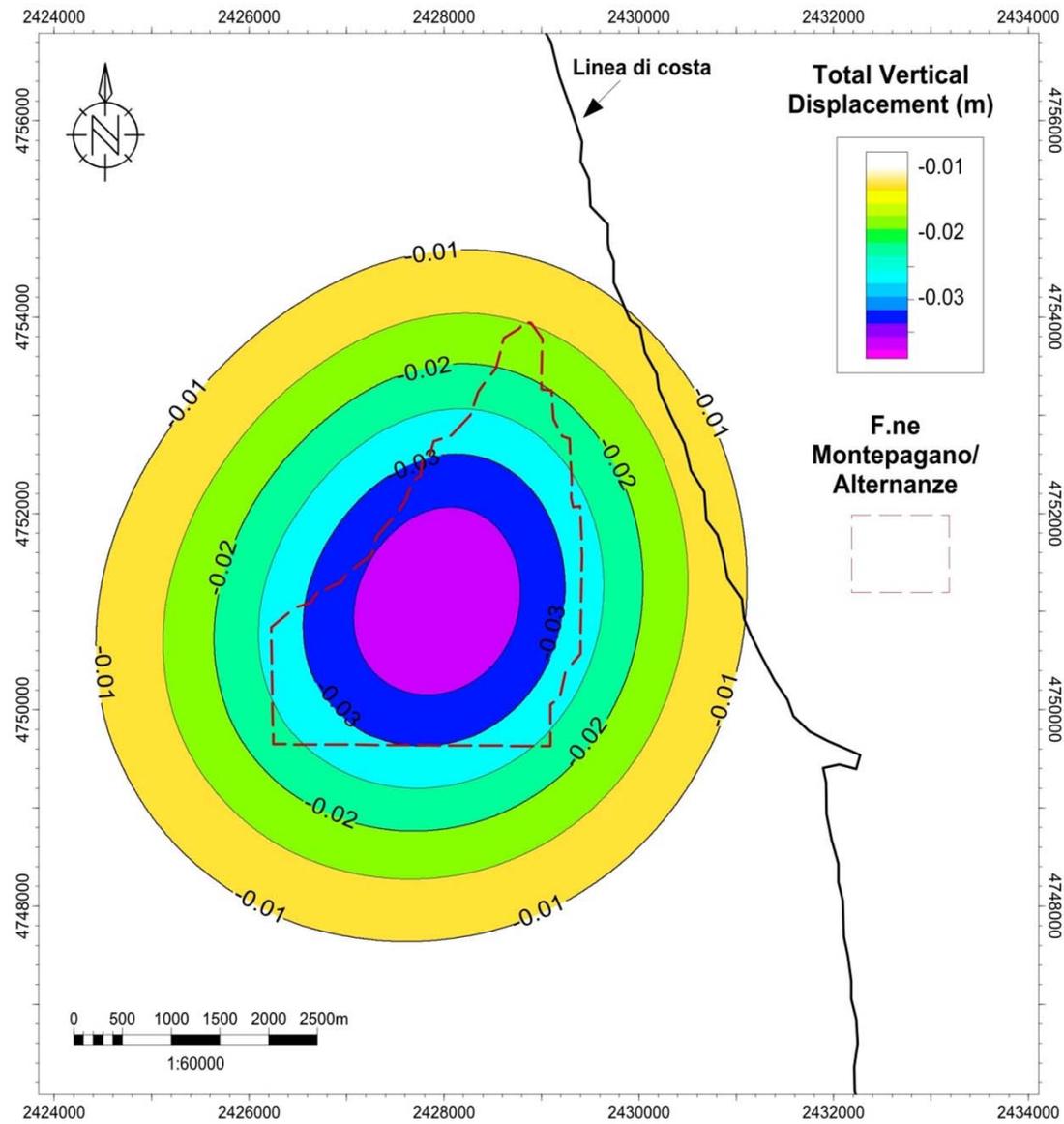
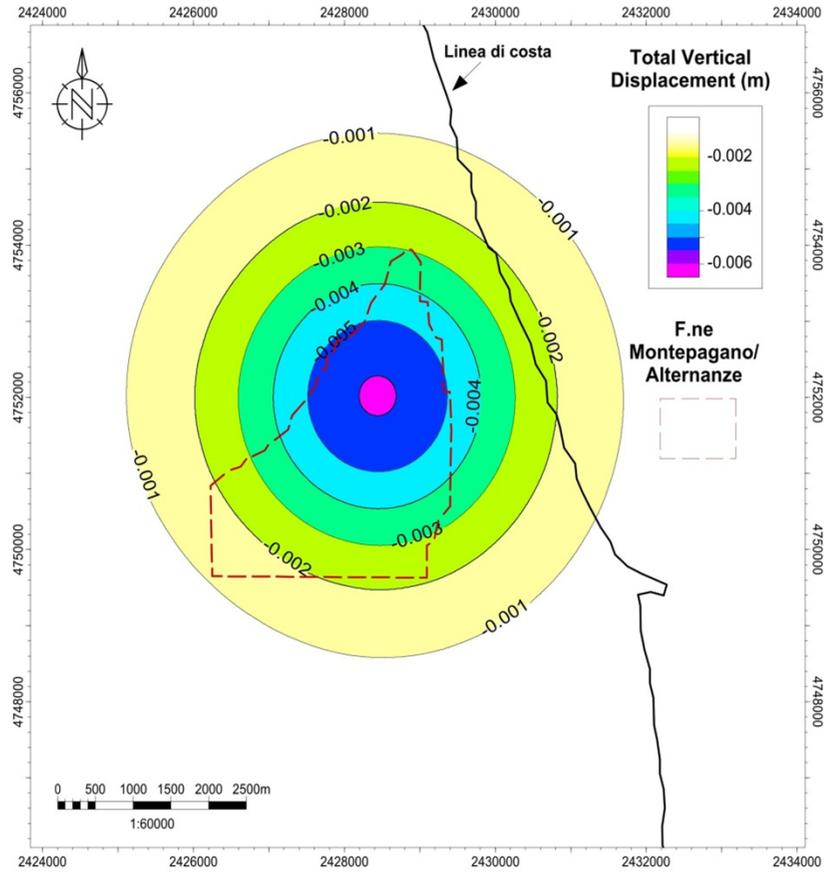


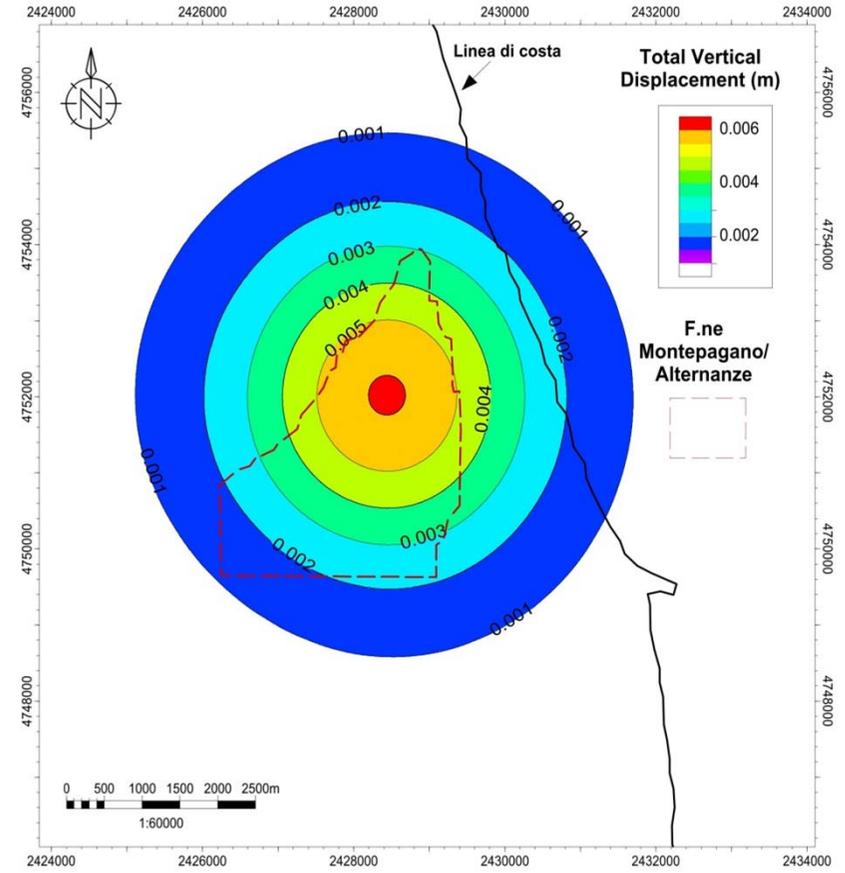
Figura 57 – Caso statico: subsidenza al termine della produzione primaria



Caso statico



(a)



(b)

Figura 58 – Caso statico: spostamenti verticali del piano campagna al termine del ciclo di produzione (a) e del ciclo di iniezione (b)



Caso medio

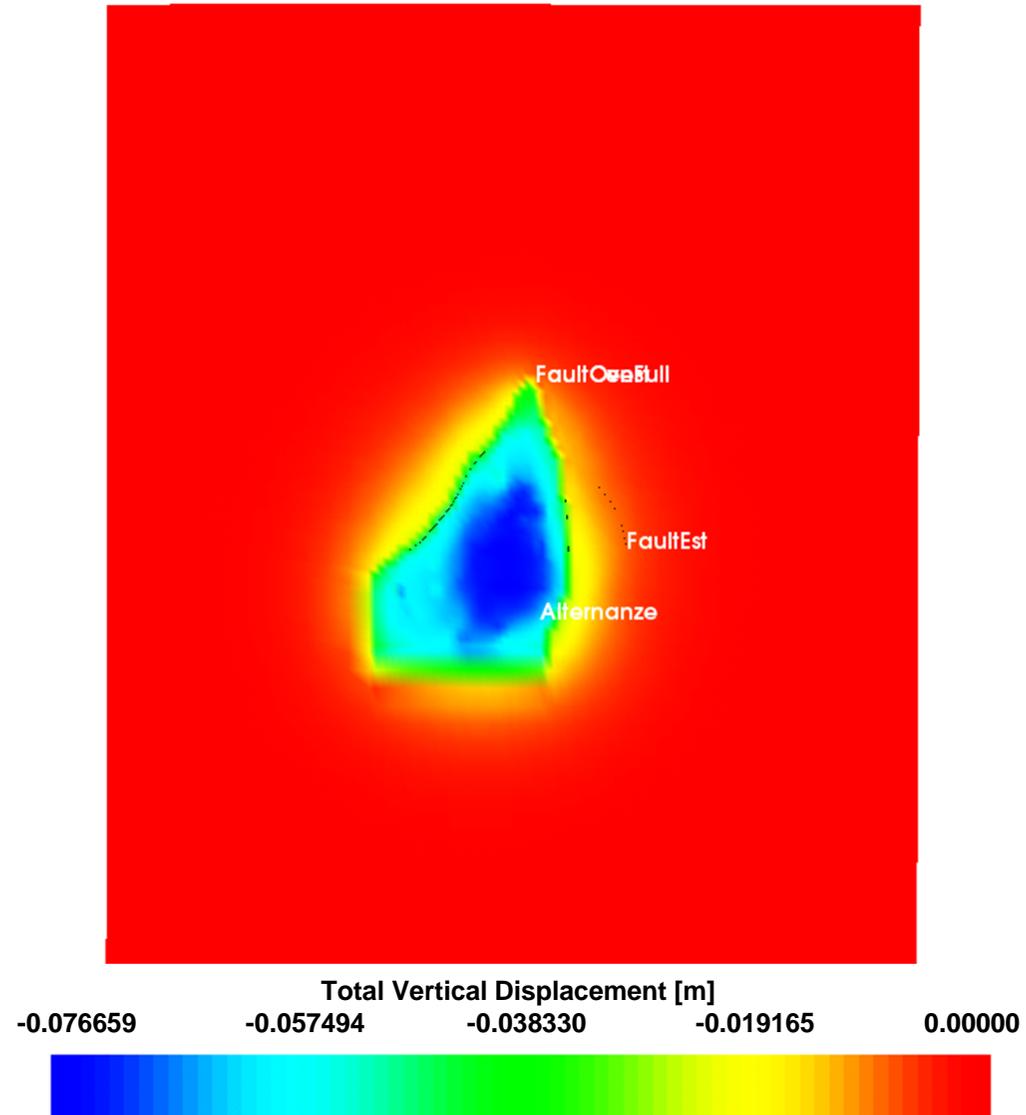


Figura 59 – F.ne Montepagano: spostamenti verticali al top del giacimento alla fine della produzione primaria



Caso medio

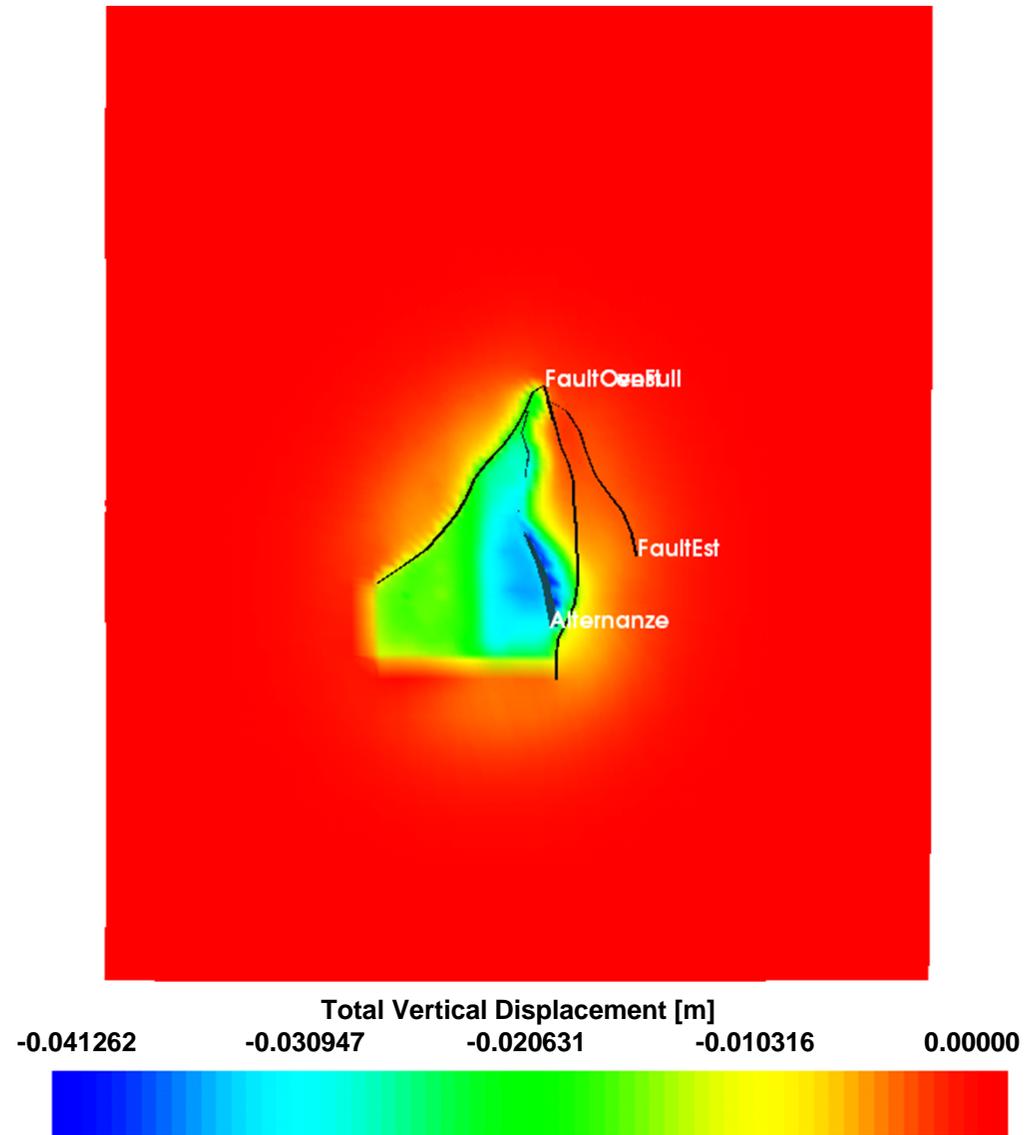


Figura 60 – F.ne Alternanze: spostamenti verticali nel livello SB4 alla fine della produzione primaria



Caso medio

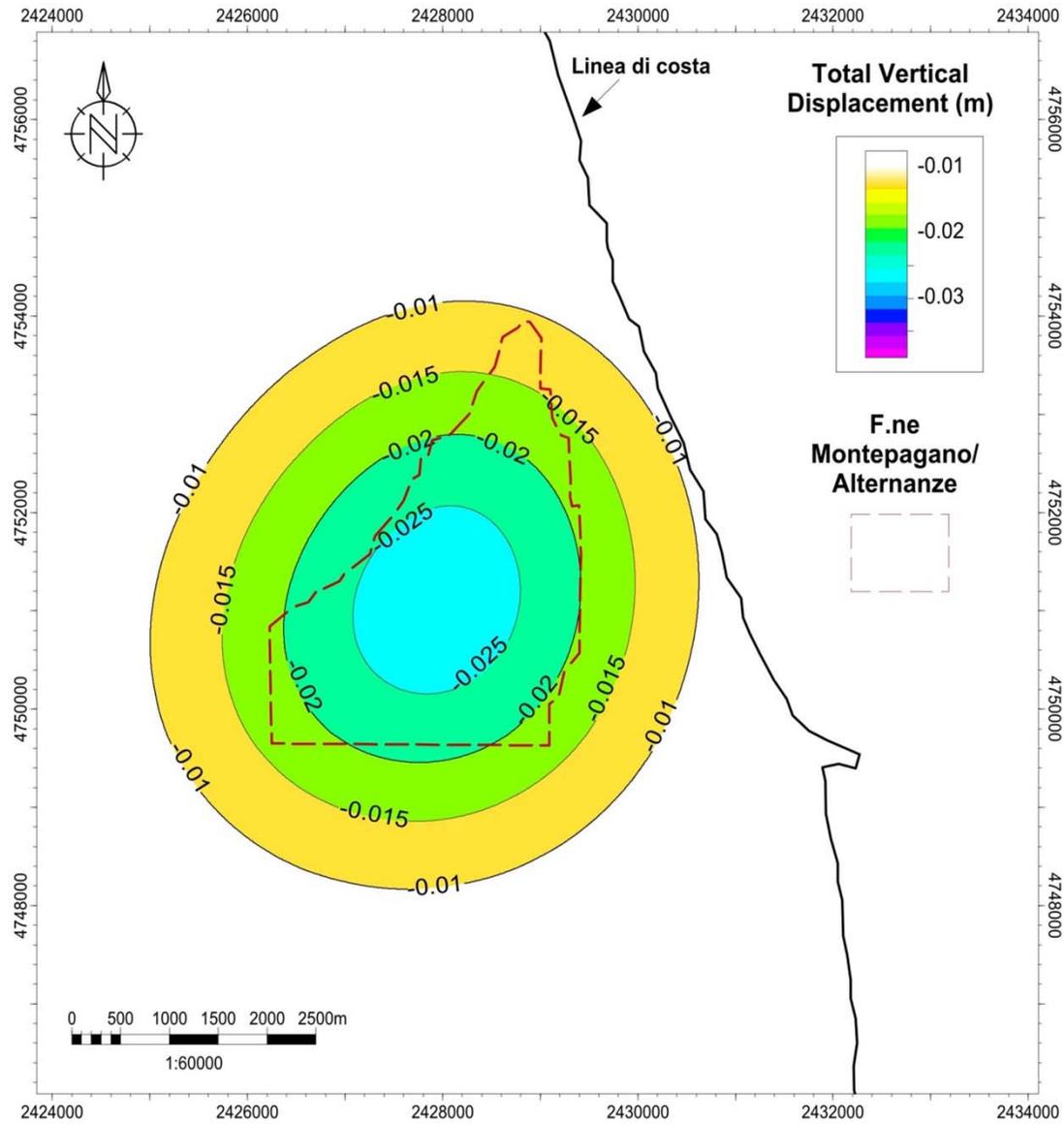
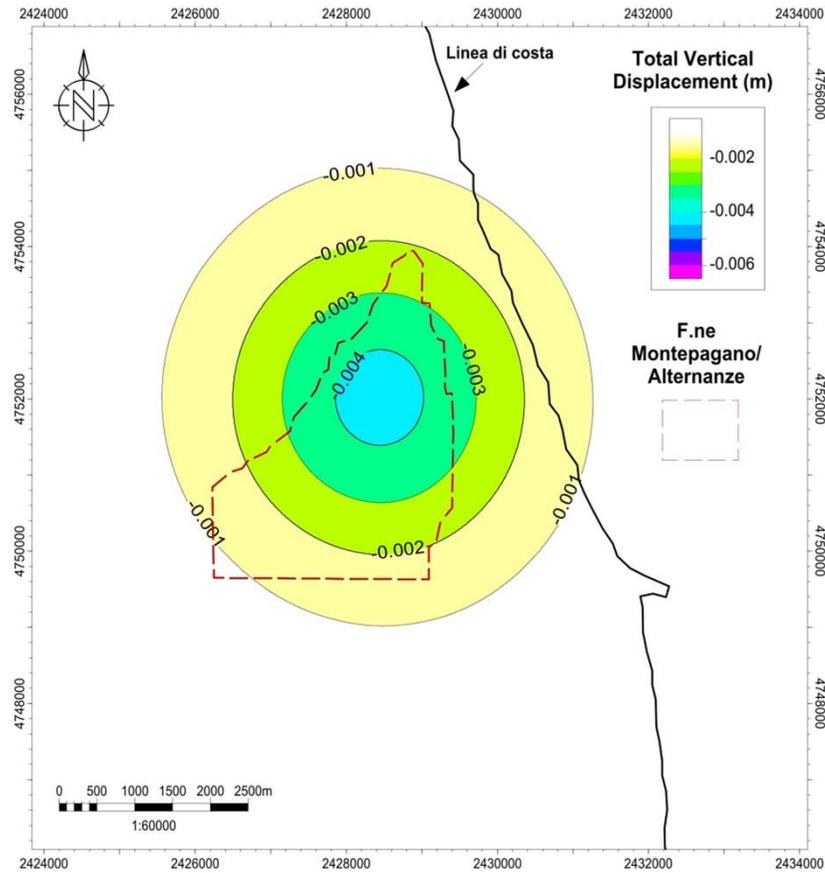


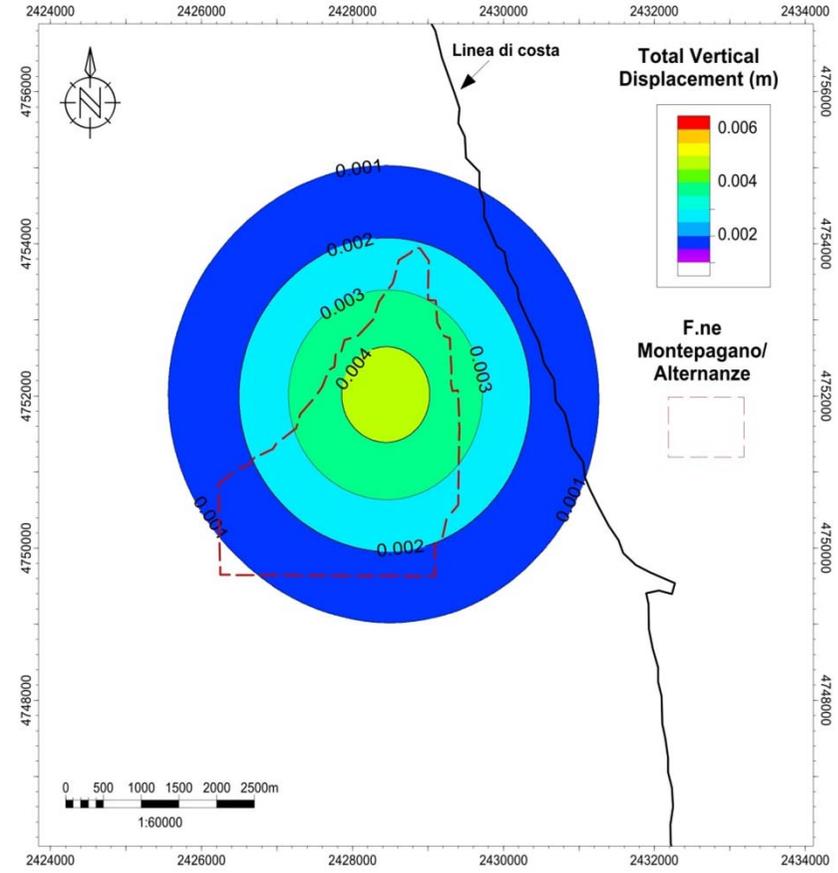
Figura 61 – Caso medio: subsidenza al termine della produzione primaria



Caso medio



(a)



(b)

Figura 62 – Caso medio: spostamenti verticali del piano campagna al termine del ciclo di produzione (a) e del ciclo di iniezione (b)



Caso dinamico

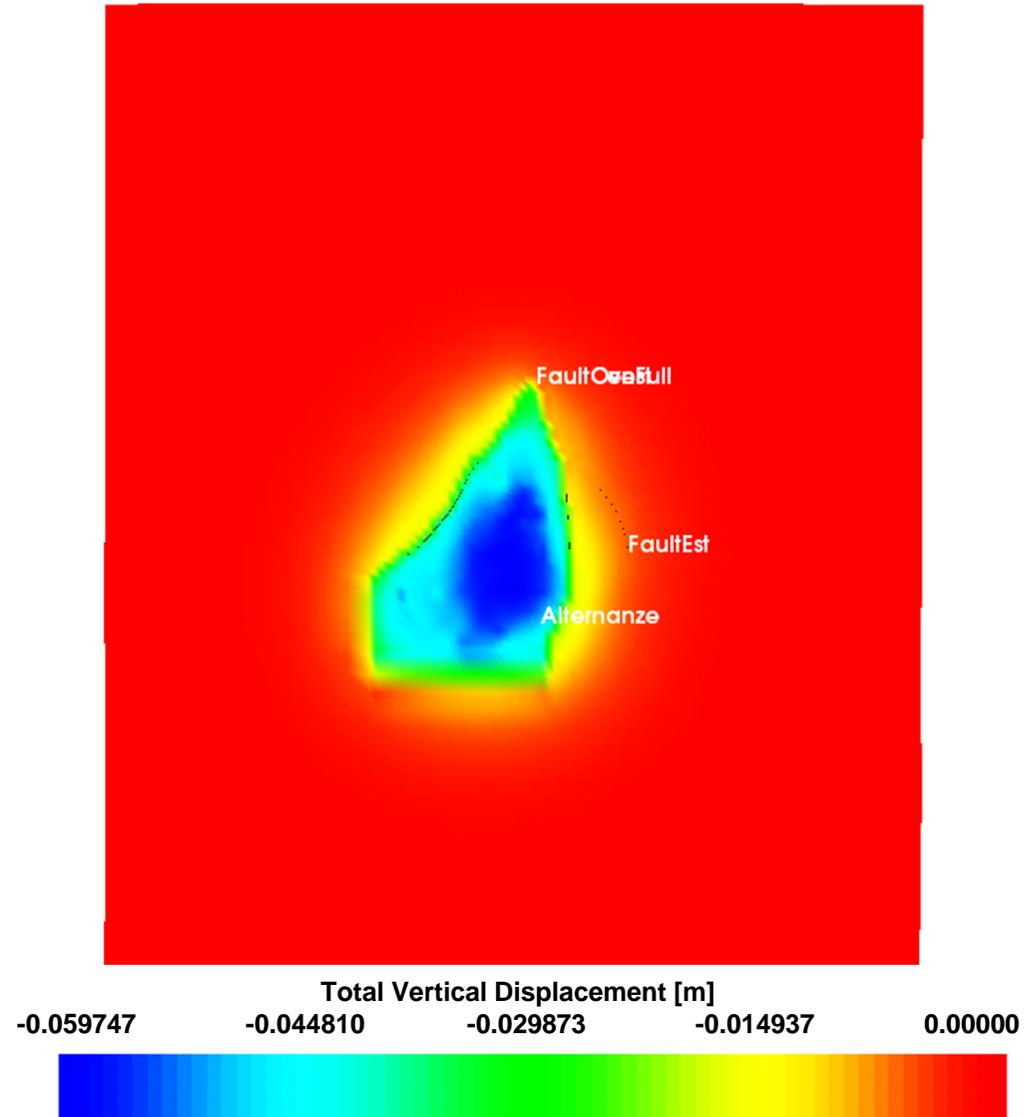


Figura 63 – F.ne Montepagano: spostamenti verticali al top del giacimento alla fine della produzione primaria



Caso dinamico

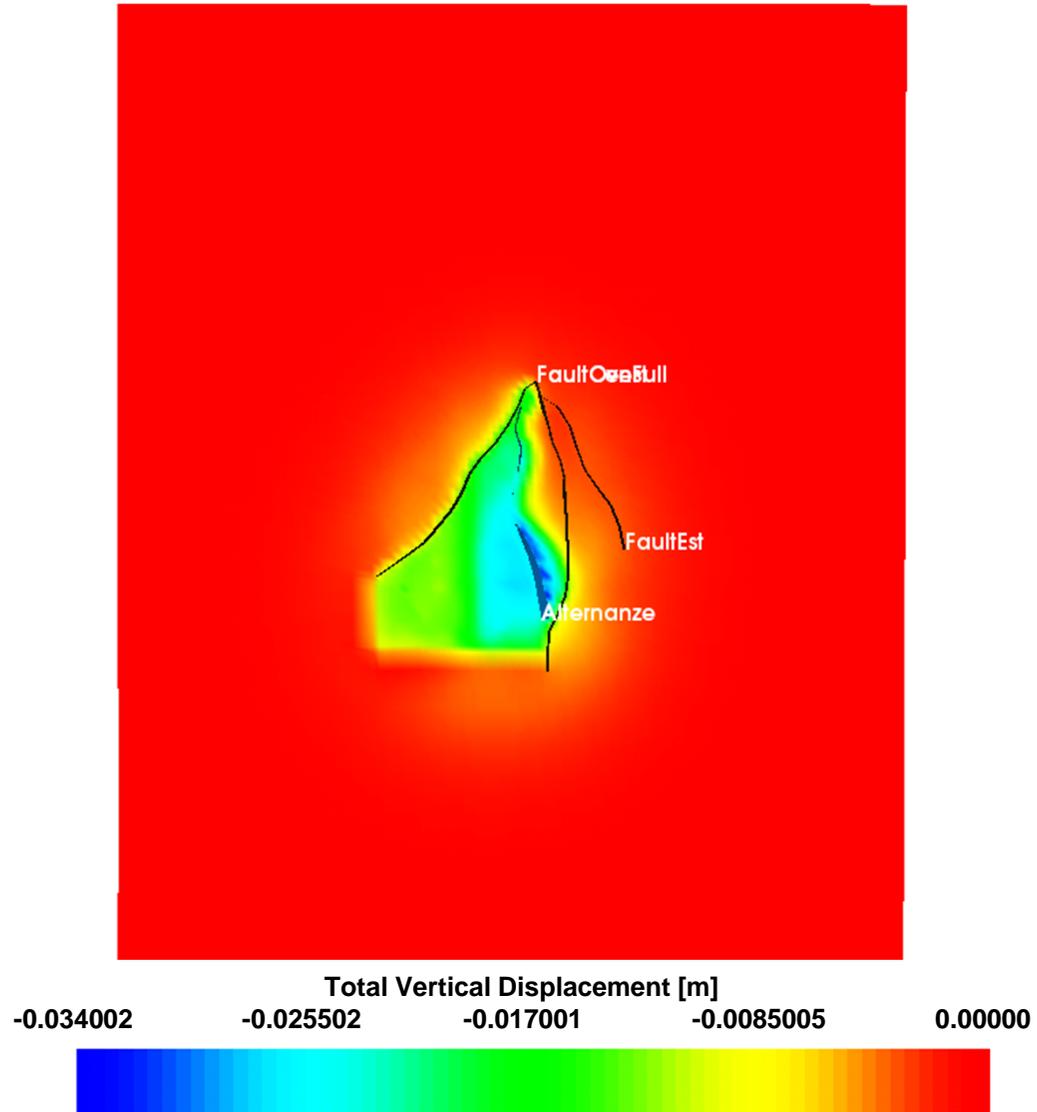


Figura 64 – F.ne Alternanze: spostamenti verticali nel livello SB4 alla fine della produzione primaria



Caso dinamico

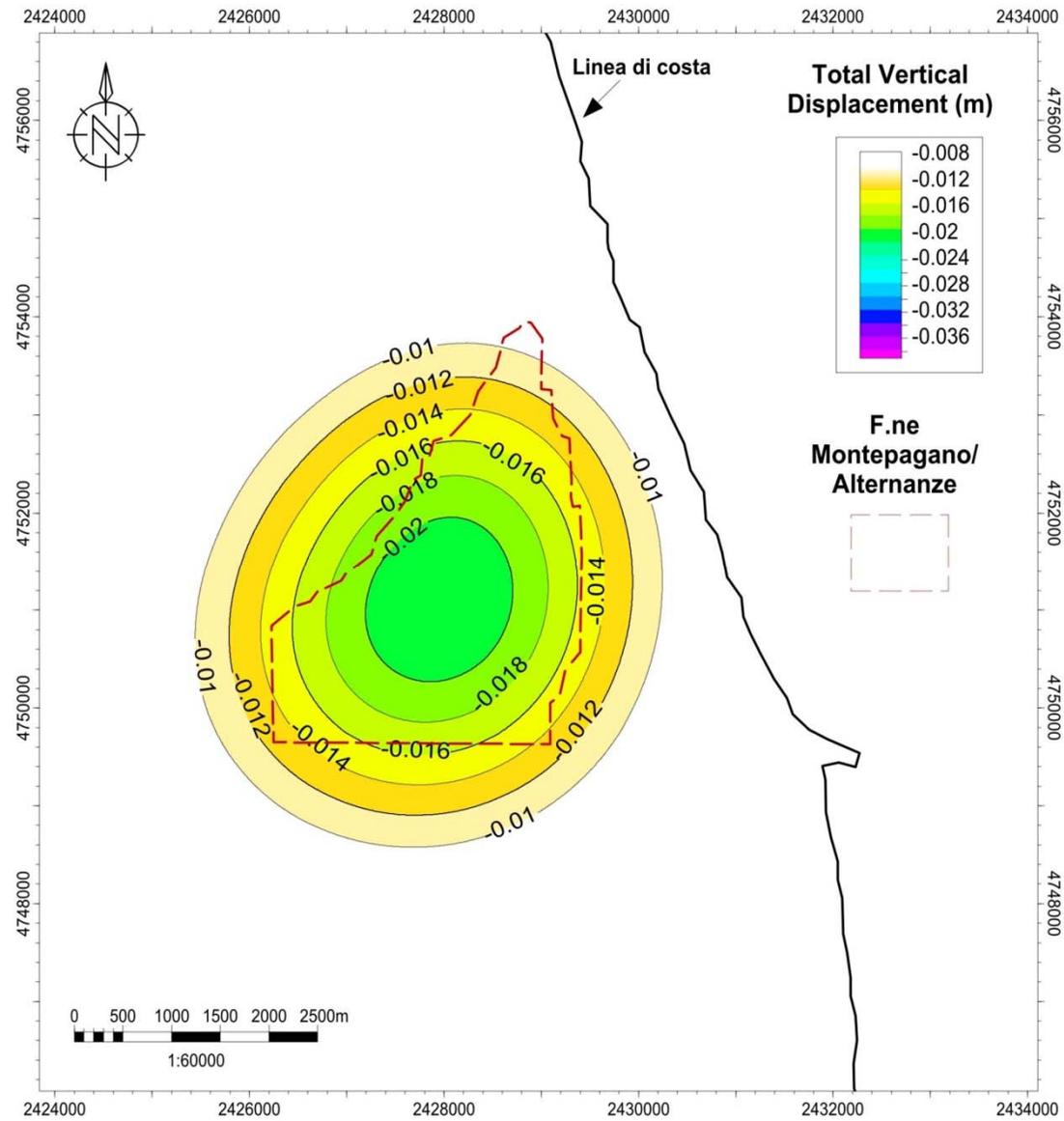
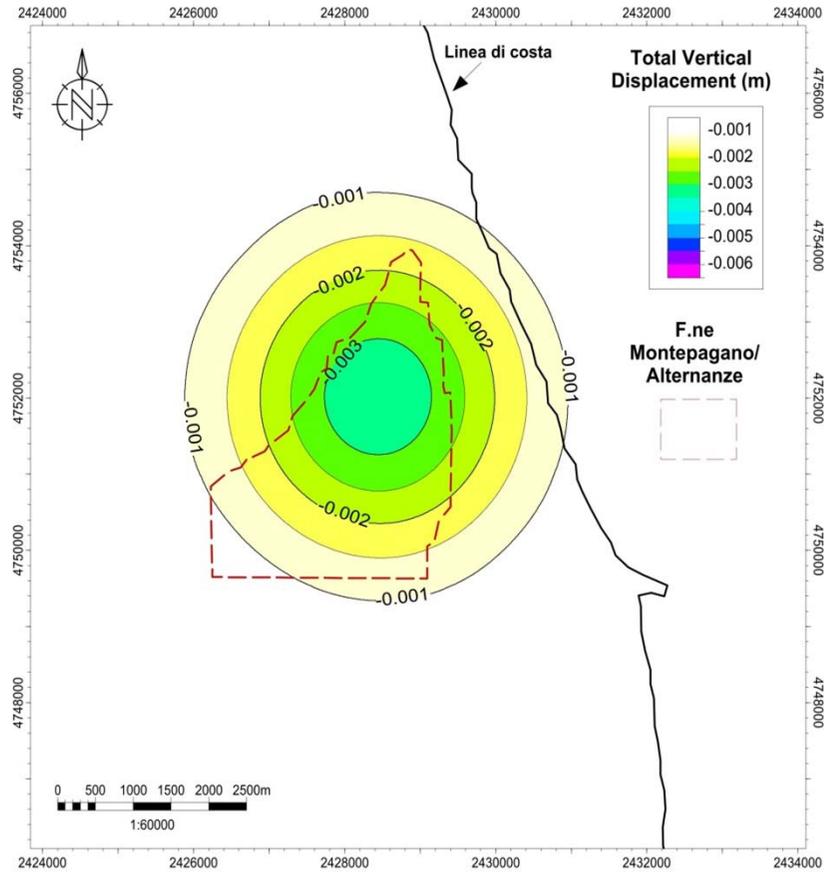


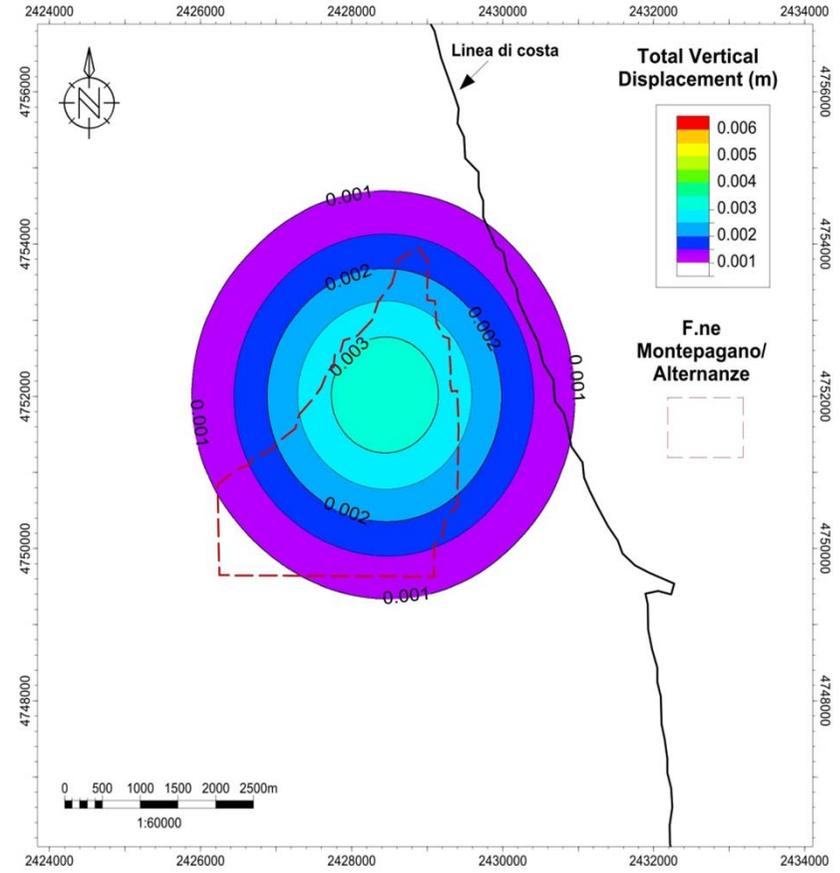
Figura 65 – Caso dinamico: subsidenza al termine della produzione primaria



Caso dinamico



(a)



(b)

Figura 66 – Caso dinamico: spostamenti verticali del piano campagna al termine del ciclo di produzione e del ciclo di iniezione