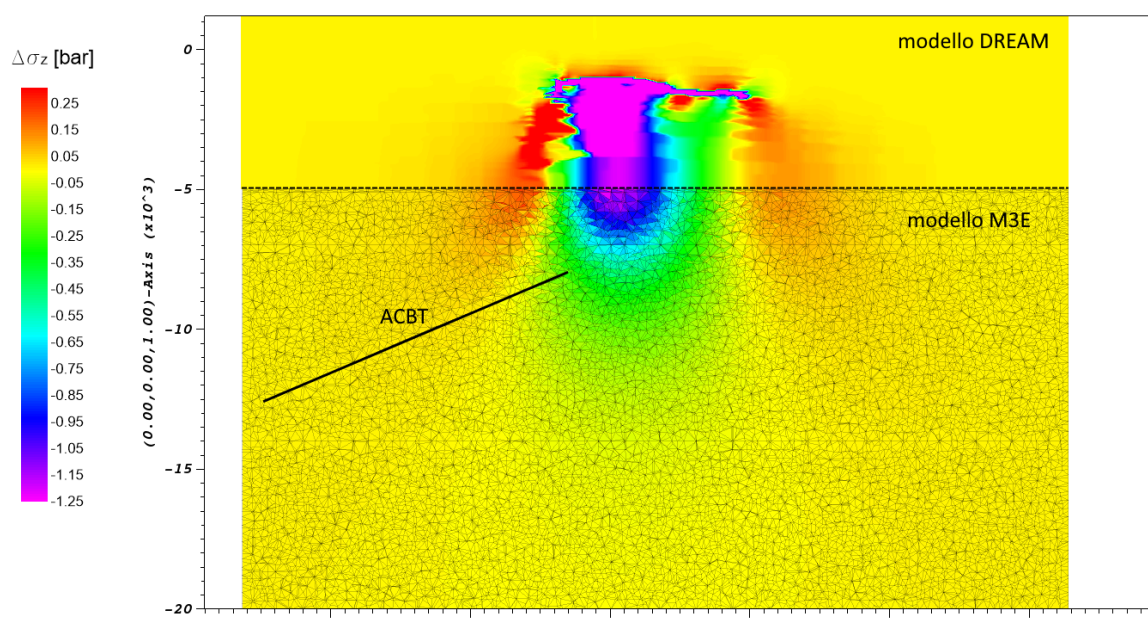


Commessa: M3E 13/19

Analisi integrative del disturbo tensionale indotto dalla coltivazione del giacimento di Colle Santo



Committente: CMI Energia srl

Elaborato: REV_2 Relazione Tecnica

Data: dicembre 2019

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	7
2	MODELLO GEOMECCANICO	8
2.1	Griglia di calcolo	10
2.2	Caratterizzazione geomeccanica.....	13
2.3	Stato tensionale iniziale	13
2.4	Forzanti esterne.....	13
3	RISULTATI NUMERICI.....	14
3.1	Propagazione del disturbo tensionale in profondità	14
3.2	Disturbo tensionale sulla sorgente sismogenetica ACBT Deep.....	20
4	CONCLUSIONI.....	25
5	REFERENZE.....	26

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Schema semplificato di una sezione verticale del modello geomeccanico sviluppato dalla DREAM (in alto) e del modello geomeccanico sviluppato da M3E (in basso).....	8
Figura 2: Modello di produzione DREAM: evoluzione temporale della pressione media in giacimento in funzione della tipologia di acquifero. La curva relativa allo scenario C è evidenziata in rosso.	9
Figura 3: Discretizzazione bidimensionale del dominio di calcolo utilizzata per la generazione del modello tridimensionale FEM. In blu è evidenziata la traccia in pianta del modello DREAM.	11
Figura 4: Isobate (m sul l.m.m.) della ACBT Deep. In blu è evidenziato il dominio bidimensionale del modello geomeccanico.....	11
Figura 5: Vista prospettica della griglia tridimensionale FEM. In nero è evidenziata la discretizzazione 2D della ACBT Deep.....	12
Figura 6: Variazione massima di σ_z durante la coltivazione del campo: (a) calcolata sugli elementi del bottom del modello DREAM; (b) calcolata sugli elementi del top del modello M3E.	15
Figura 7: Variazione massima di τ_{yz} durante la coltivazione del campo: (a) calcolata sugli elementi del bottom del modello DREAM; (b) calcolata sugli elementi del top del modello M3E.....	15
Figura 8: Variazione massima di τ_{zx} durante la coltivazione del campo: (a) calcolata sugli elementi del bottom del modello DREAM; (b) calcolata sugli elementi del top del modello M3E.....	16
Figura 9: Variazione massima di σ_z durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3.....	16
Figura 10: Variazione massima di τ_{xy} durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3.....	17
Figura 11: Variazione massima di τ_{yz} durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3.....	17
Figura 12: Variazione massima di τ_{zx} durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3.....	18
Figura 13: Variazione massima di σ_x durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3.....	18

Figura 14: Variazione massima di σ_y durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3..... 19

Figura 15: Variazione massima di σ_N [bar], sulla ACBT Deep durante la coltivazione del campo, i valori negativi indicano un effetto stabilizzante. In linea tratteggiata sono riportate le tracce delle sezioni A-A e B-B di Figura 15.....21

Figura 16: Variazione massima di τ up-dip [bar] sulla ACBT Deep durante la coltivazione del campo, i valori negativi indicano un effetto stabilizzante. In linea tratteggiata sono riportate le tracce delle sezioni A-A e B-B di Figura 15.....21

Figura 17: Variazione massima di CFF [bar] sulla ACBT Deep durante la coltivazione del campo, i valori negativi indicano un effetto stabilizzante. In linea tratteggiata rossa e blu sono riportate le tracce delle sezioni A-A e B-B di Figura 15, rispettivamente. In nero tratteggiato è riportato il bordo della ACBT Deep più vicino al giacimento, sul quale sono localizzati i valori minimi e massimi.....22

Figura 18: Variazione massima di CFF [bar] lungo la sezione B-B di Figura 3, ortogonale alla ACBT Deep, durante la coltivazione del campo.....23

Figura 19: Particolare di Figura 18: variazione massima di CFF [bar] lungo la sezione B-B di Figura 3, ortogonale alla ACBT Deep, durante la coltivazione del campo.....23

Figura 20: Variazione massima di CFF [bar] lungo il bordo C1-C2 della ACBT Deep riportato in Figura 17, durante la coltivazione del campo.24

I INTRODUZIONE

Il presente rapporto tecnico descrive i risultati ottenuti dalle analisi integrative in relazione al disturbo tensionale indotto dalla coltivazione del giacimento di Colle Santo.

Lo studio costituisce un'integrazione alle analisi modellistiche condotte in precedenza dalla DREAM [2016, 2017] per conto di CMI Energia (nel seguito si farà riferimento a tali analisi con l'espressione "modello DREAM").

La finalità principale dell'integrazione è la previsione della propagazione del disturbo tensionale efficace (per brevità, nel seguito si farà riferimento alle "tensioni efficaci" semplicemente con "tensioni") a una profondità compresa tra i -5'000 m s.l.m.m. e i -20'000 m s.l.m.m., con particolare attenzione alla sorgente sismogenetica ITCS078 "Abruzzo Citeriore Basal Thrust Deep" (nel seguito si farà riferimento a tale sorgente sismogenetica con "ACBT Deep").

Il rapporto è strutturato come segue: la descrizione dettagliata del modello geomeccanico messo a punto da M3E è riportata al capitolo 2 (nel seguito si farà riferimento a tale modello con l'espressione "modello M3E"); il capitolo 3 riassume i risultati numerici ottenuti dall'applicazione del modello M3E; il capitolo 4 raccoglie le considerazioni conclusive.

2 MODELLO GEOMECCANICO

Un modello geomeccanico agli elementi finiti ed elementi di interfaccia è stato sviluppato per valutare la propagazione in profondità e sulla ACBT Deep del disturbo tensionale indotto dalla coltivazione del giacimento. Tale modello è l'estensione in profondità dello strato basale dei calcari e calcareniti del modello DREAM (Figura 1). Questo approccio è ammissibile in quanto gli elementi del modello DREAM rimangono in regime di elasticità lineare.

Per il set-up sono state utilizzate le seguenti informazioni fornite da CMI Energia:

- le coordinate spaziali (x,y,z) dei baricentri degli elementi esaedrici che costituiscono la griglia di calcolo del modello DREAM;
- le variazioni di tensione massima indotta durante la coltivazione del campo in corrispondenza dei baricentri degli elementi esaedrici del modello DREAM;
- la caratterizzazione geomeccanica dello strato basale dei calcari e calcareniti (modulo elastico di Young e coefficiente di contrazione di Poisson) del modello DREAM;
- le coordinate spaziali (xyz) della superficie ACBT Deep.

Conservativamente, per quanto riguarda la caratterizzazione geomeccanica e le variazioni di tensione indotte si è fatto riferimento allo "scenario C" analizzato dalla DREAM che prevede la massima variazione di tensione indotta a quota -5'000 m s.l.m.m..

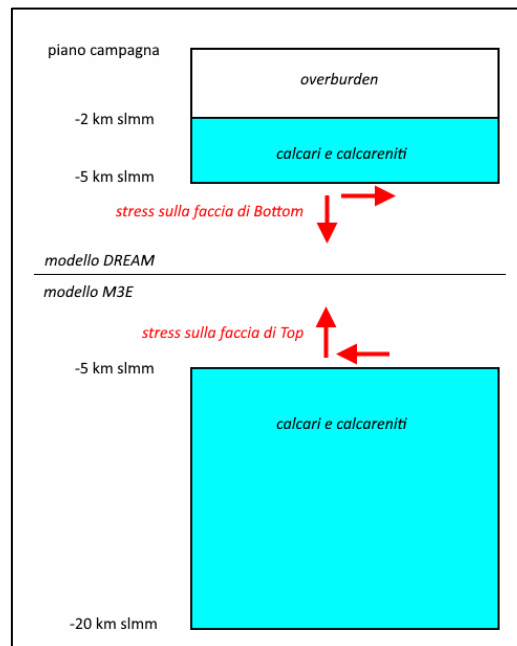


Figura 1: Schema semplificato di una sezione verticale del modello geomeccanico sviluppato dalla DREAM (in alto) e del modello geomeccanico sviluppato da M3E (in basso).

Secondo questo scenario il giacimento viene messo in produzione con 4 pozzi (due esistenti e due da perforare), la spinta dell'acquifero viene considerata media, e le formazioni sono state caratterizzate con moduli elastici statici conservativi. Come mostrato in Figura 2, i valori massimi di depressurizzazione media del giacimento (e quindi di variazione tensionale efficace) vengono raggiunti alla fine della produzione, 15° anno dall'inizio della coltivazione.

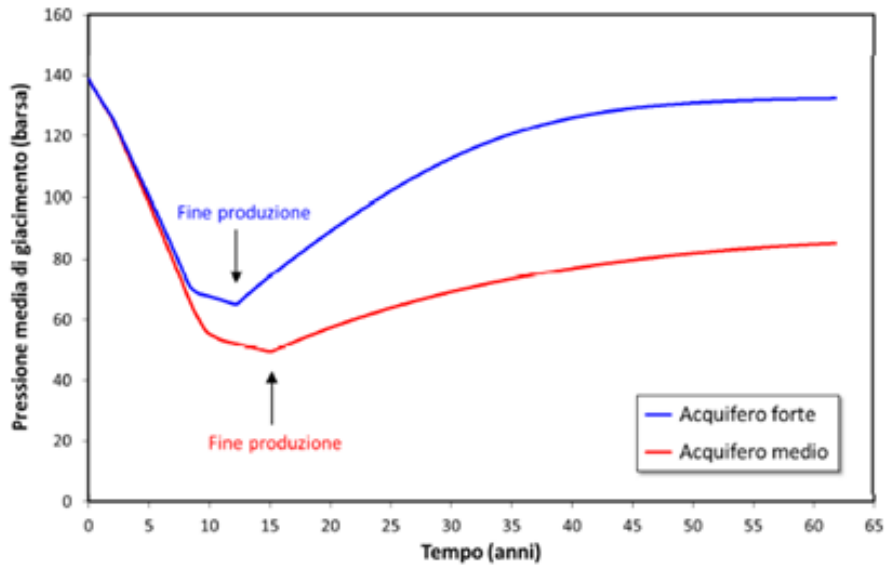


Figura 2: Modello di produzione DREAM: evoluzione temporale della pressione media in giacimento in funzione della tipologia di acquifero. La curva relativa allo scenario C è evidenziata in rosso.

2.1 Griglia di calcolo

In questo studio si è impiegato un dominio di calcolo avente la stessa estensione areale del modello DREAM. Il dominio 2D è stato discretizzato mediante 2'627 nodi e 5'066 elementi triangolari con uno spacing medio di circa 500 m (Figura 3).

La griglia di calcolo 3D è stata ottenuta utilizzando il generatore automatico di griglia TetGen [Si, 2008], con l'accortezza di vincolare i vari layer di elementi finiti alla geometria degli orizzonti geologici. Viene così generato un dominio parallelepipedo che ha il basamento posto a 20 km di profondità ed è limitato superiormente dal bottom del modello DREAM.

All'interno del dominio di calcolo è presente la ACBT Deep (Figura 4): tale sorgente corrisponderebbe a un segmento di sovrascorrimento principale, immergente con angoli variabili tra 20° e 40° verso Sud-Ovest, che si sarebbe attivato in occasione del terremoto del 1706 [Scrocca, 2018]. Questa discontinuità strutturale è stata rappresentata inserendo all'interno della griglia ad elementi finiti degli appropriati elementi detti "elementi d'interfaccia" che, raddoppiando i nodi giacenti sulla superficie lungo la quale il thrust si sviluppa, permettono la simulazione della possibile riattivazione della discontinuità qualora lo stato tensionale raggiunga un valore critico definito attraverso un criterio alla Mohr-Coulomb [Franceschini *et al.*, 2016]. Sono stati utilizzati 589 elementi di interfaccia per simulare il comportamento del thrust. La griglia così generata consiste complessivamente di 268'471 nodi e 1'677'821 elementi. La vista prospettica dell'intera griglia del modello geomeccanico è mostrata in Figura 5.

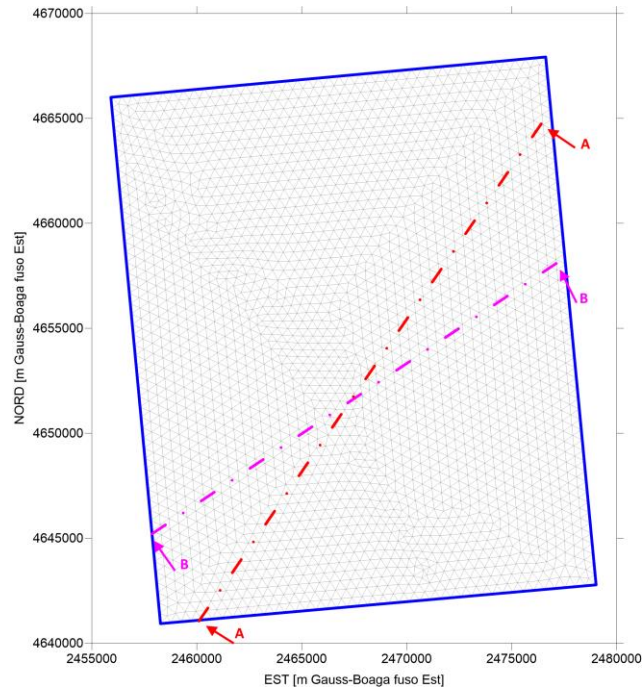


Figura 3: Discretizzazione bidimensionale del dominio di calcolo utilizzata per la generazione del modello tridimensionale FEM. In blu è evidenziata la traccia in pianta del modello DREAM.

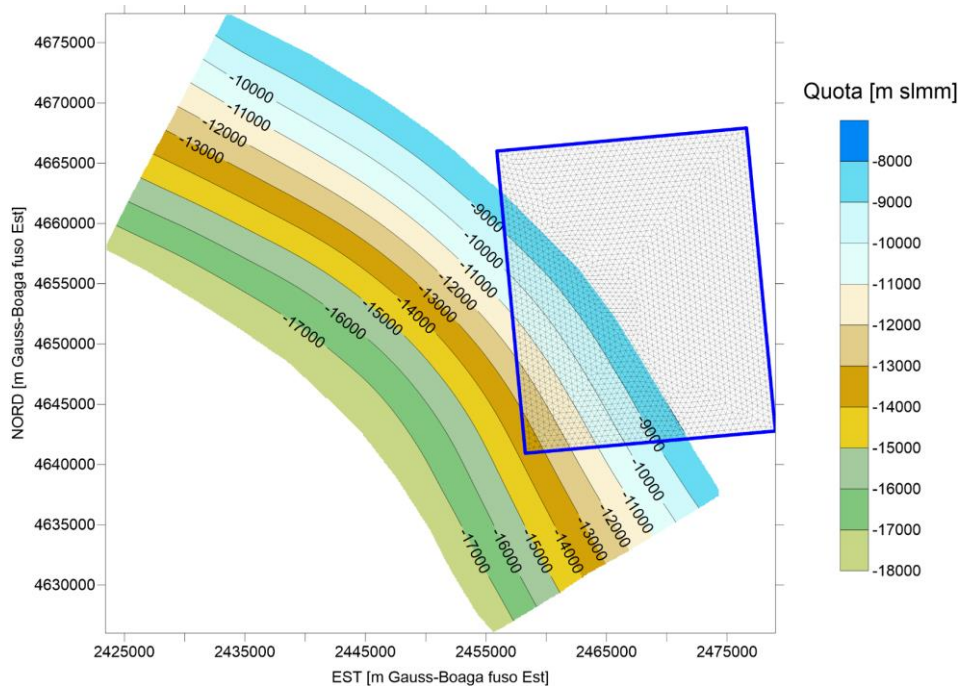


Figura 4: Isobate (m sul l.m.m.) della ACBT Deep. In blu è evidenziato il dominio bidimensionale del modello geomeccanico.

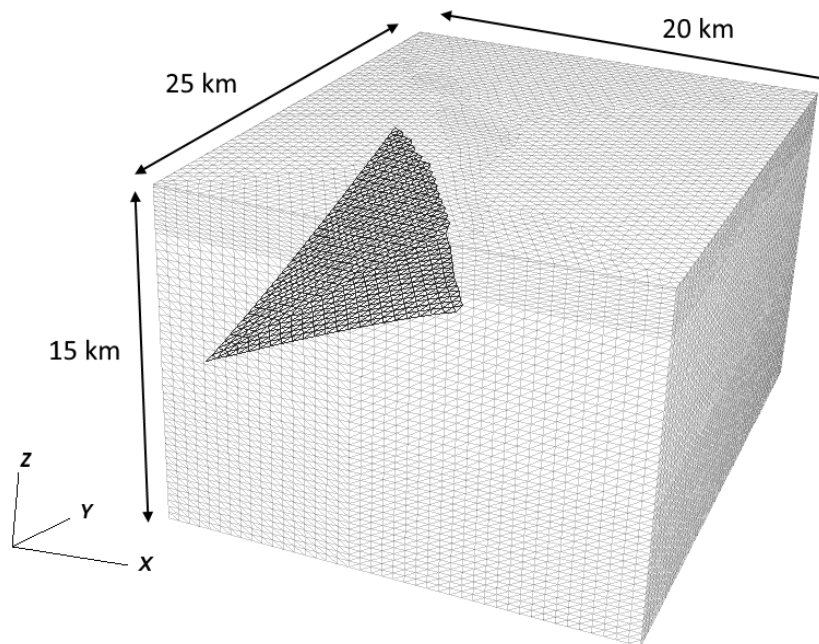


Figura 5: Vista prospettica della griglia tridimensionale FEM. In nero è evidenziata la discretizzazione 2D della ACBT Deep.

2.2 Caratterizzazione geomeccanica

La caratterizzazione geomeccanica, in accordo con il modello DREAM, è stata eseguita utilizzando una relazione costitutiva elastica lineare con modulo di Young pari a 27 GPa e coefficiente di contrazione di Poisson pari a 0.3.

2.3 Stato tensionale iniziale

Lo stato tensionale è stato inizializzato coerentemente al modello DREAM:

- tensione verticale σ_z calcolata considerando pressione dell'acqua idrostatica e densità:

Strato	Densità [g/m ³]
Alluvionale	1.9
Depositi marini	2.3
Alloctono	2.3
Argille	2.3
Evaporiti	2.4
Cap rock	2.6
Reservoir	2.7
Calcari	2.7

- tensione verticale σ_z assunta come tensione principale;
- tensione orizzontale minima σ_h e massima σ_H assunte pari a:

$$\sigma_h = \sigma_H = 0.9 \sigma_z$$

2.4 Forzanti esterne

Per garantire la continuità tra i due modelli geomeccanici le componenti del tensore di stress normali alla superficie di bottom del modello DREAM ($\Delta\sigma_z$, $\Delta\tau_{yz}$, $\Delta\tau_{zx}$) sono state trasferite come forzanti esterne sulla superficie di top del modello M3E (Figura 1).

3 RISULTATI NUMERICI

Di seguito sono presentati i risultati numerici in termini di variazione di tensione efficace indotta dalla coltivazione del giacimento di Colle Santo. Particolare attenzione è data alla propagazione del disturbo tensionale in profondità e sul thrust ACBT Deep. A tale proposito si fa riferimento alle due sezioni rappresentative mostrate in Figura 3: (1) la sezione A-A, passante per il centro del campo e quasi diagonale alla traccia in pianta del modello geomeccanico, è utilizzata per la visualizzazione della propagazione di tensione in profondità; (2) la sezione B-B, passante per il centro del campo e ortogonale al piano de thrust, è utilizzata per la visualizzazione delle variazioni di tensione con effetto stabilizzante e destabilizzante lungo il thrust stesso.

3.1 Propagazione del disturbo tensionale in profondità

Alla profondità di 5 km le componenti del tensore di stress normali alla superficie in comune tra i due modelli ($\Delta\sigma_z$, $\Delta\tau_{yz}$, $\Delta\tau_{zx}$) non presentano discontinuità: i valori di tensione sugli elementi di bottom del modello DREAM sono uguali a quelli sugli elementi di top del modello M3E (Figura 6, Figura 7 e Figura 8).

In Figura 9 - Figura 14 è mostrata la propagazione in profondità del disturbo tensionale massimo indotto dalla coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3 passante per il giacimento. La discontinuità nelle componenti $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$, $\Delta\tau_{xy}$ è dovuta a una diversa discretizzazione verticale degli elementi dei due modelli: il modello DREAM ha una discretizzazione molto grossolana sugli elementi di bottom e di conseguenza il gradiente verticale delle tensioni ($\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$, $\Delta\tau_{xy}$) è mediato su un'area più ampia.

La variazione di tensione è inferiore a 0.05 bar (50 millibar) a profondità maggiori di 15 km.

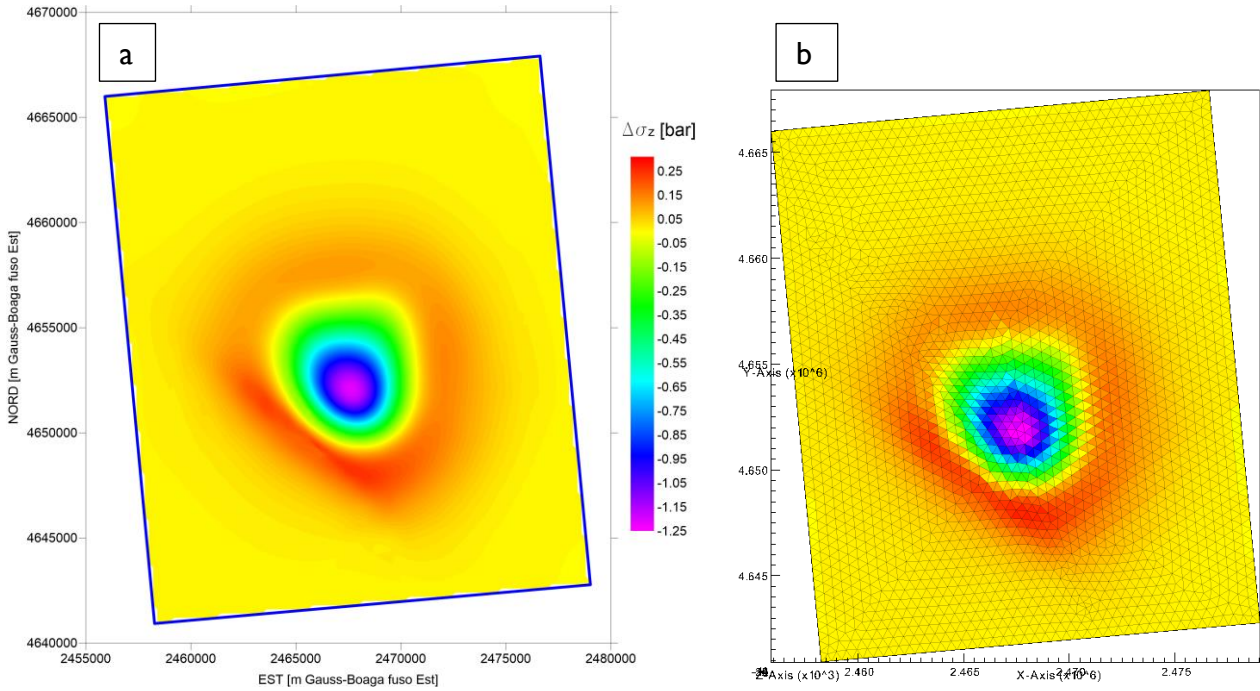


Figura 6: Variazione massima di σ_z durante la coltivazione del campo: (a) calcolata sugli elementi del bottom del modello DREAM; (b) calcolata sugli elementi del top del modello M3E.

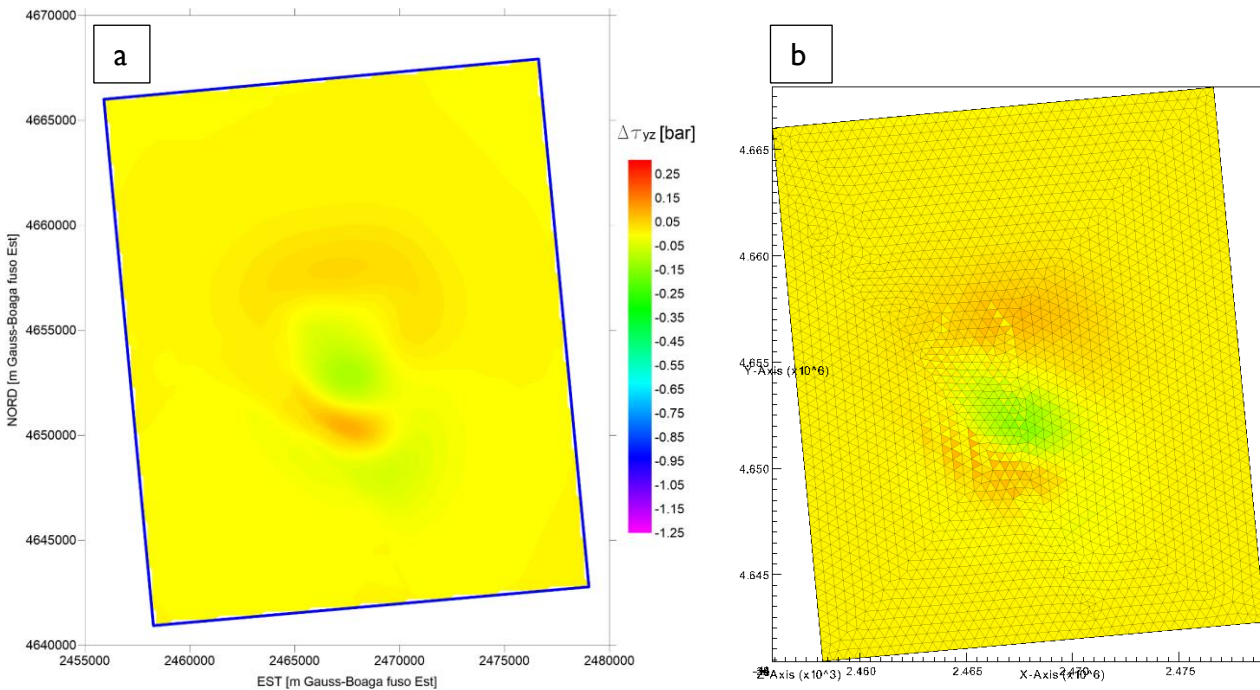


Figura 7: Variazione massima di τ_{yz} durante la coltivazione del campo: (a) calcolata sugli elementi del bottom del modello DREAM; (b) calcolata sugli elementi del top del modello M3E.

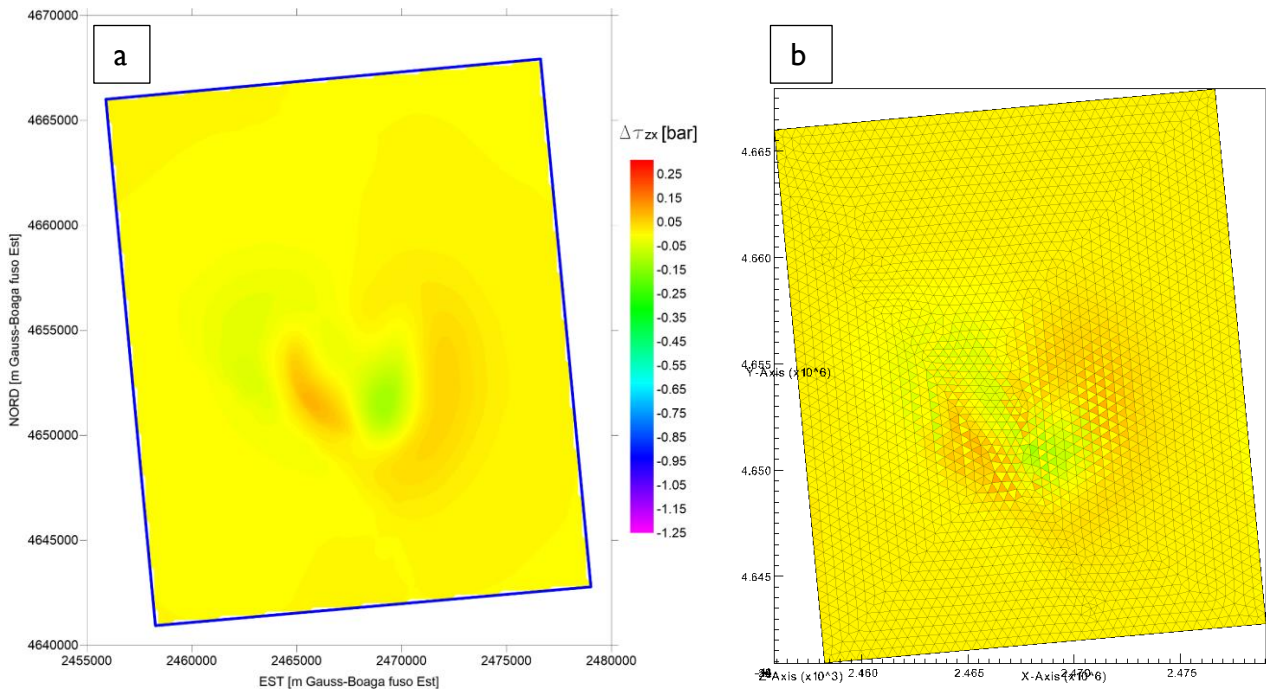


Figura 8: Variazione massima di τ_{zx} durante la coltivazione del campo: (a) calcolata sugli elementi del bottom del modello DREAM; (b) calcolata sugli elementi del top del modello M3E.

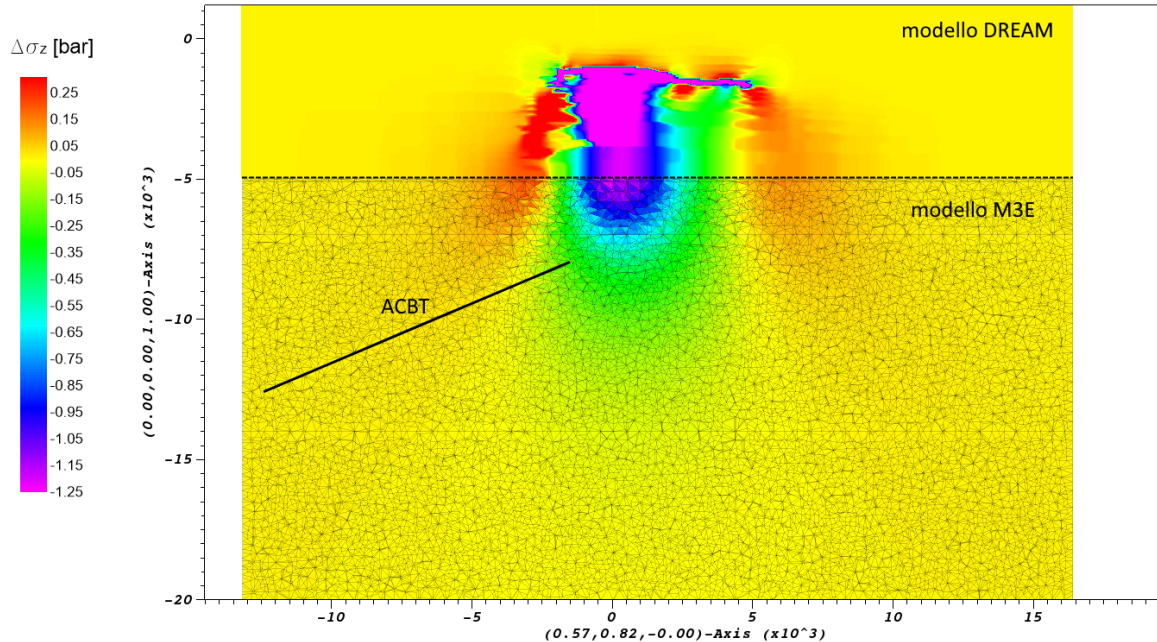


Figura 9: Variazione massima di σ_z durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3.

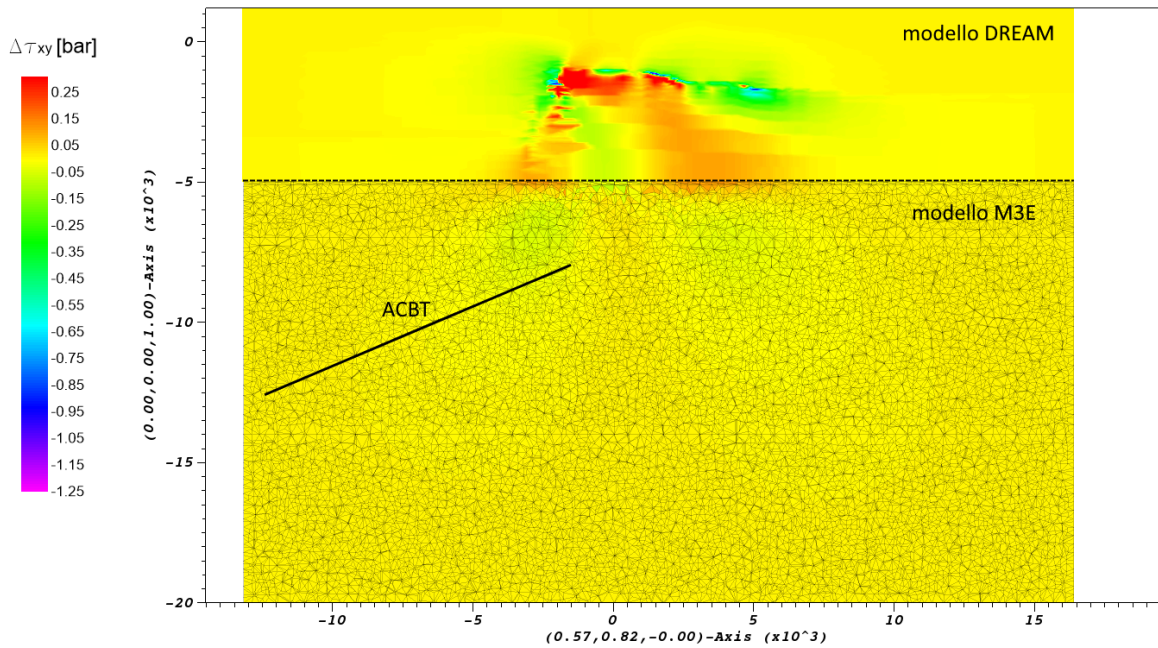


Figura 10: Variazione massima di τ_{xy} durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3.

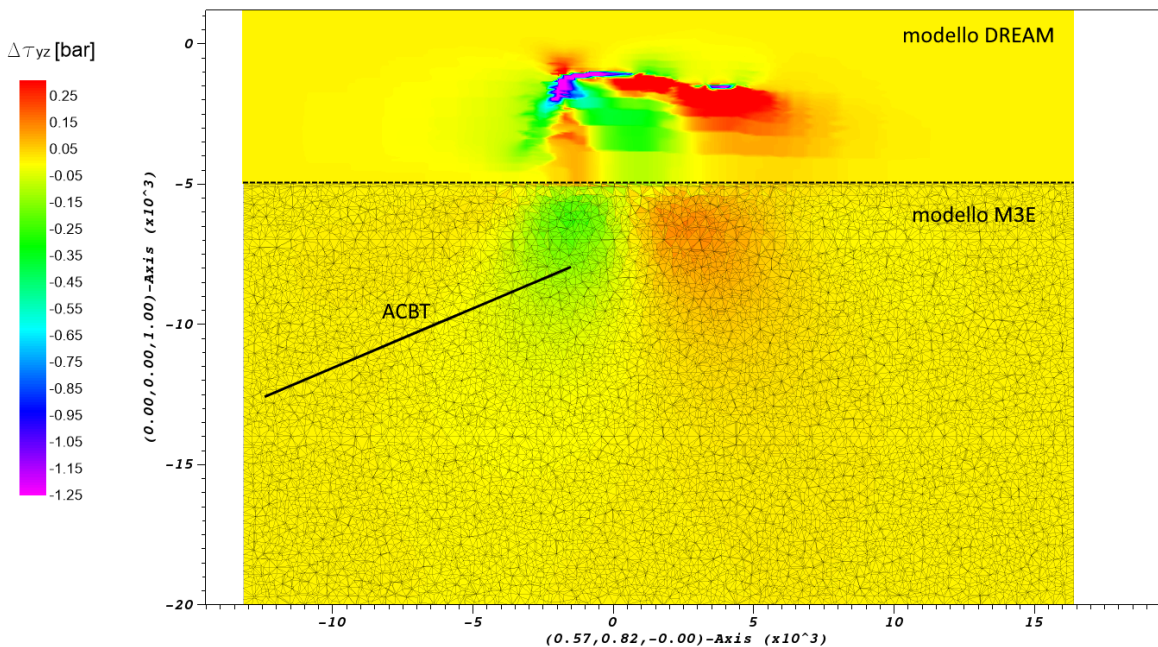


Figura 11: Variazione massima di τ_{yz} durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3.

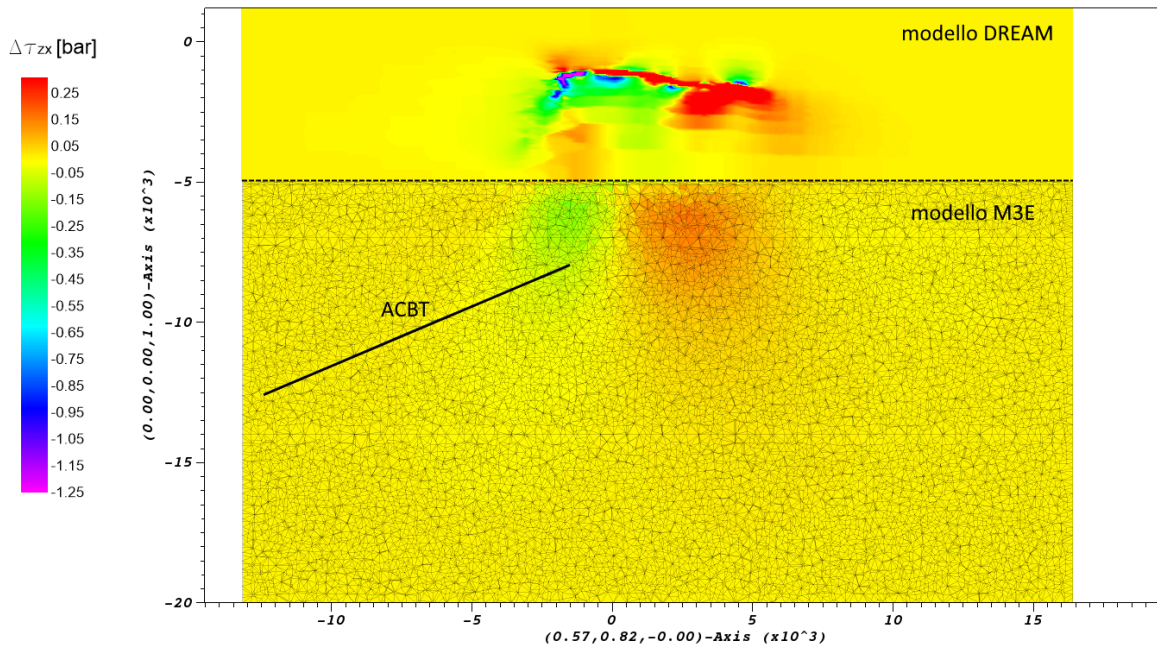


Figura 12: Variazione massima di τ_{zx} durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3.

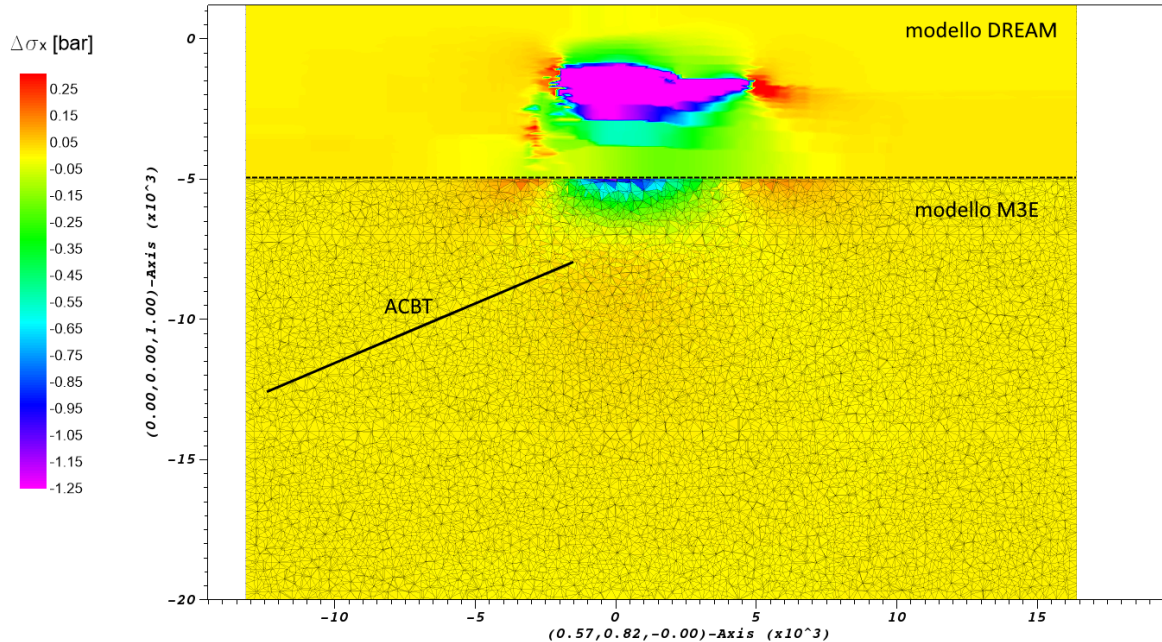


Figura 13: Variazione massima di σ_x durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3.

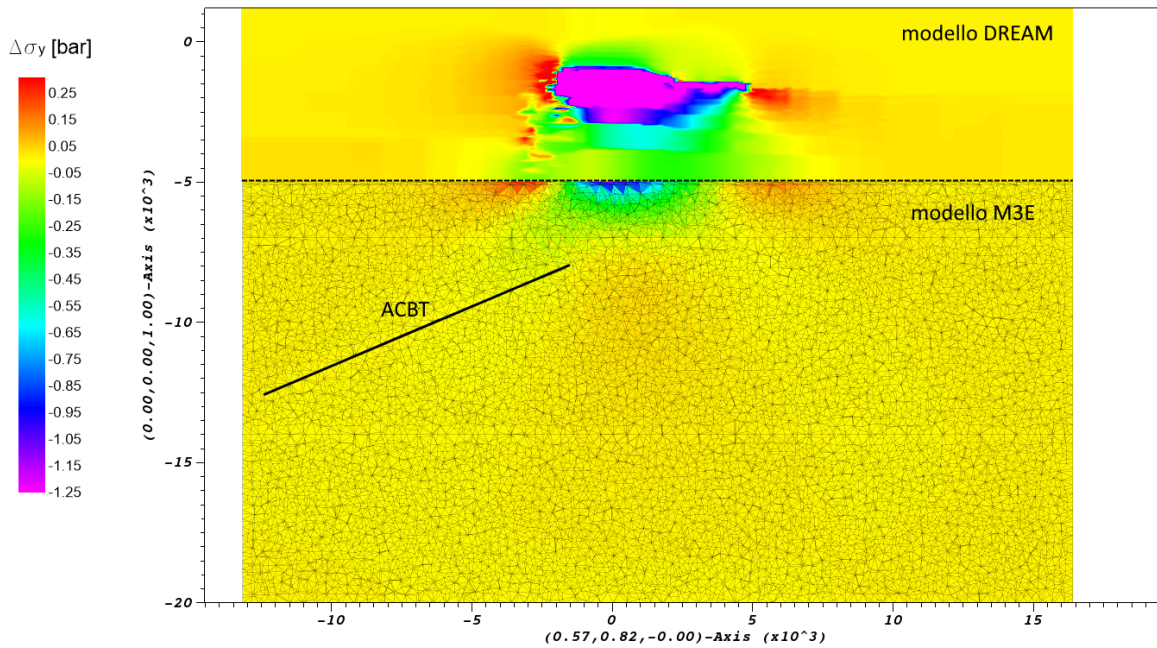


Figura 14: Variazione massima di σ_y durante la coltivazione del campo lungo la sezione verticale A-A di Figura 3.

3.2 Disturbo tensionale sulla sorgente sismogenetica ACBT Deep

In Figura 15 e Figura 16 è mostrata la variazione di tensione normale $\Delta\sigma_N$ e tangenziale $\Delta\tau$ up-dip al piano del thrust: il disturbo tensionale massimo è pari a 0.08 bar per la tensione normale e 0.16 bar per la tensione tangenziale. In termini percentuali, le variazioni massime sono pari allo 0.01% e 0.33% delle tensioni iniziali, rispettivamente per la tensione normale e tangenziale.

Su indicazione di CMI Energia, è stato valutato come la perturbazione tensionale contribuisce al meccanismo di rottura calcolando la variazione del limite ultimo secondo Mohr-Coulomb, Coulomb Failure Function (ΔCFF), indotta dalla coltivazione di giacimento [Jha and Juanes, 2014, Juanes et al., 2016]:

$$\Delta CFF = \Delta\tau + \mu\Delta\sigma_N$$

dove $\Delta\tau$ è la variazione di tensione tangenziale sulla superficie del thrust (negativa se scarica la tensione tangenziale generata dal meccanismo di back thrust), $\Delta\sigma_N$ è la variazione di tensione normale al thrust (negativa se di compressione) e μ è il coefficiente di attrito assunto pari a 0.6 (corrispondente a circa 30°). Un valore negativo di ΔCFF indica un effetto stabilizzante. In Figura 17 è riportato il valore di ΔCFF sulla ACBT Deep: la struttura sismogenetica Deep ACBT viene interessata da variazioni tensionali che comportano un effetto stabilizzante nella sua porzione più prossima al giacimento. Il valore minimo di ΔCFF , con effetto stabilizzante, si ha nel punto più prossimo al giacimento con valore di -0.2 bar (-200 millibar). L'effetto stabilizzante decresce allontanandosi dal punto di massimo, fino ad invertirsi nel segno e manifestare un effetto destabilizzante con un valore massimo di ΔCFF di 0.025 bar (25 millibar). Allontanandosi ancora il segno cambia nuovamente per tornare a manifestare nuovamente un effetto stabilizzante, ma con valori prossimi allo zero (Figura 18, Figura 19 e Figura 20).

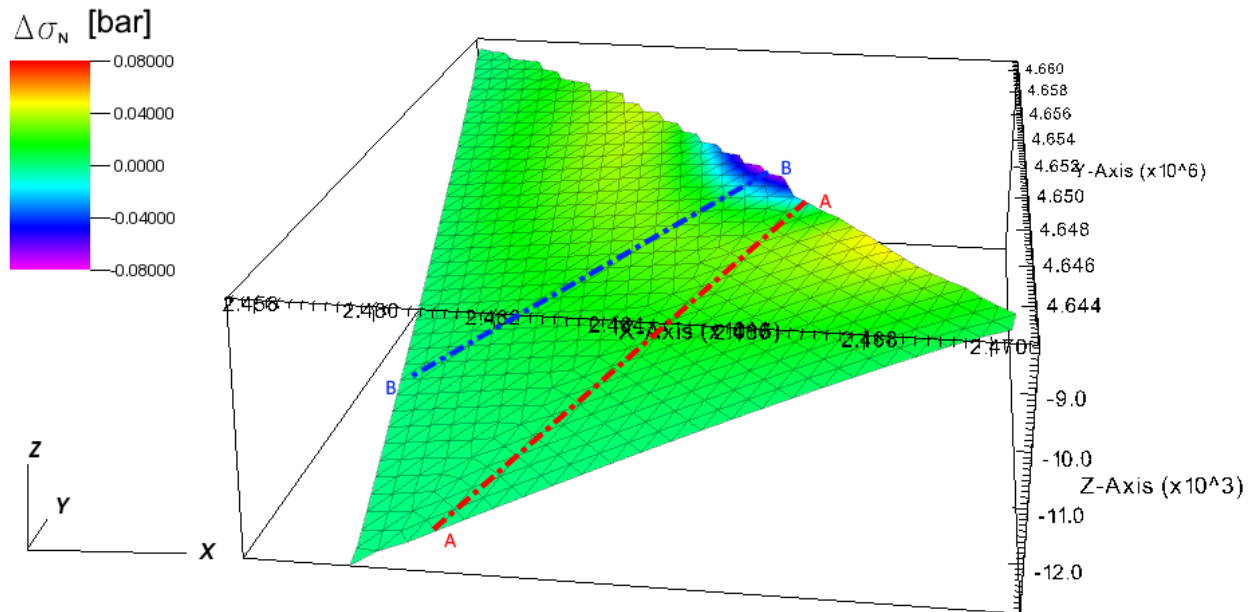


Figura 15: Variazione massima di σ_N [bar], sulla ACBT Deep durante la coltivazione del campo, i valori negativi indicano un effetto stabilizzante. In linea tratteggiata sono riportate le tracce delle sezioni A-A e B-B di Figura 15.

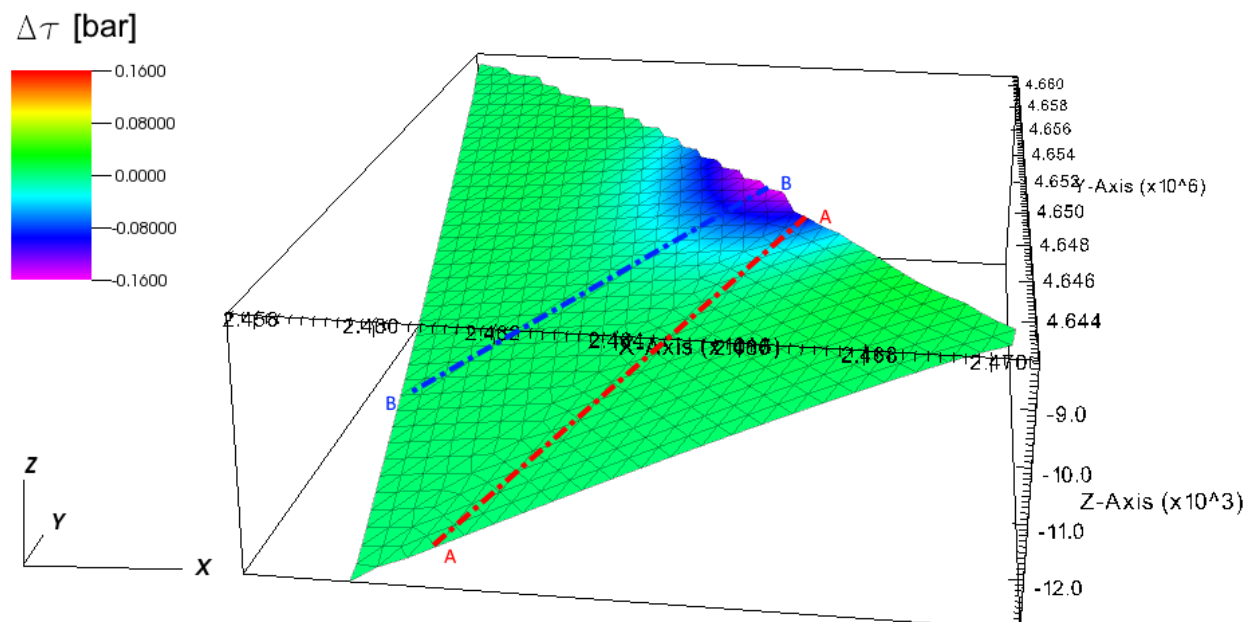


Figura 16: Variazione massima di τ up-dip [bar] sulla ACBT Deep durante la coltivazione del campo, i valori negativi indicano un effetto stabilizzante. In linea tratteggiata sono riportate le tracce delle sezioni A-A e B-B di Figura 15.

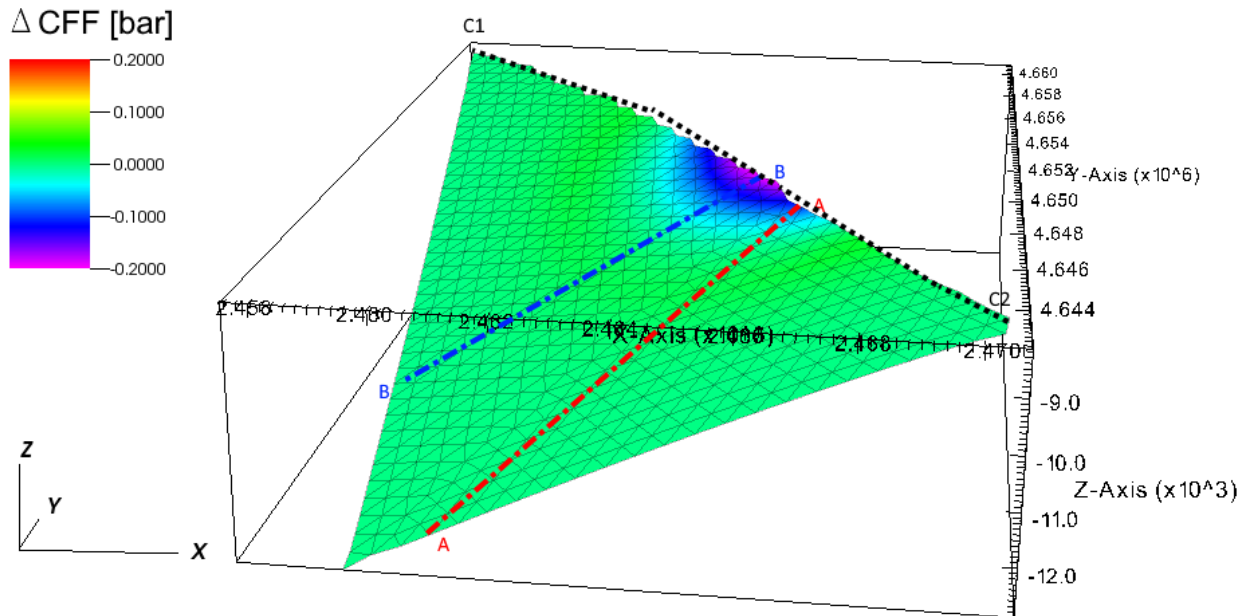


Figura 17: Variazione massima di CFF [bar] sulla ACBT Deep durante la coltivazione del campo, i valori negativi indicano un effetto stabilizzante. In linea tratteggiata rossa e blu sono riportate le tracce delle sezioni A-A e B-B di Figura 15, rispettivamente. In nero tratteggiato è riportato il bordo della ACBT Deep più vicino al giacimento, sul quale sono localizzati i valori minimi e massimi.

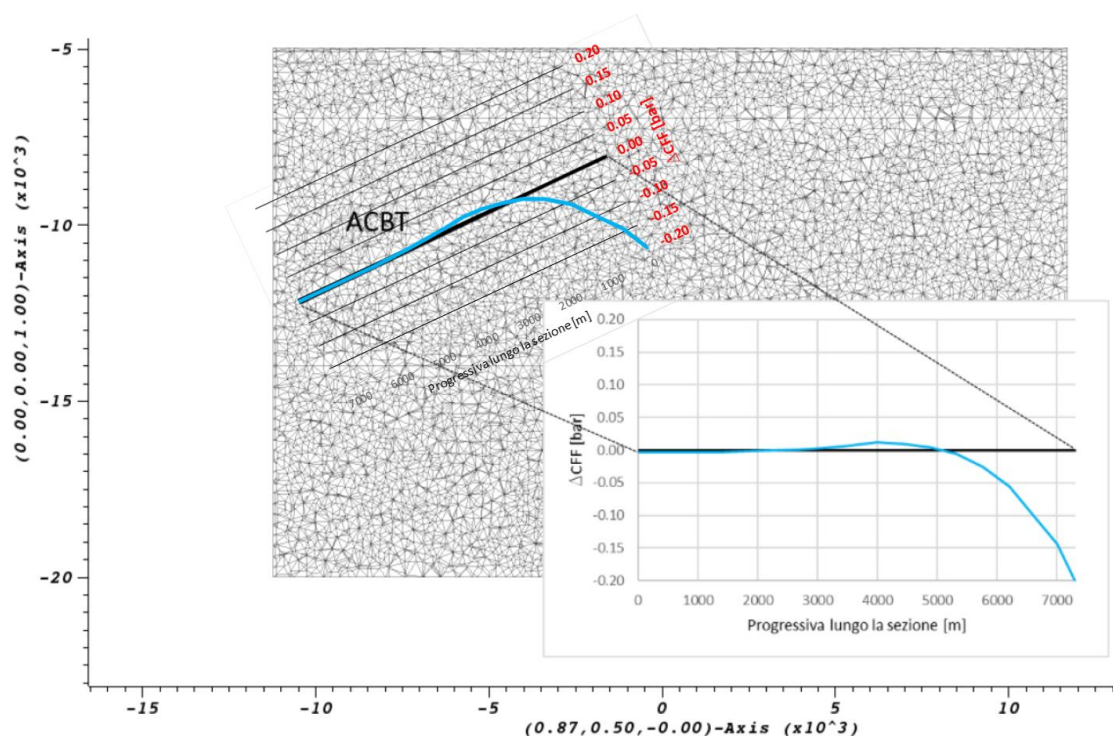


Figura 18: Variazione massima di CFF [bar] lungo la sezione B-B di Figura 3, ortogonale alla ACBT Deep, durante la coltivazione del campo.

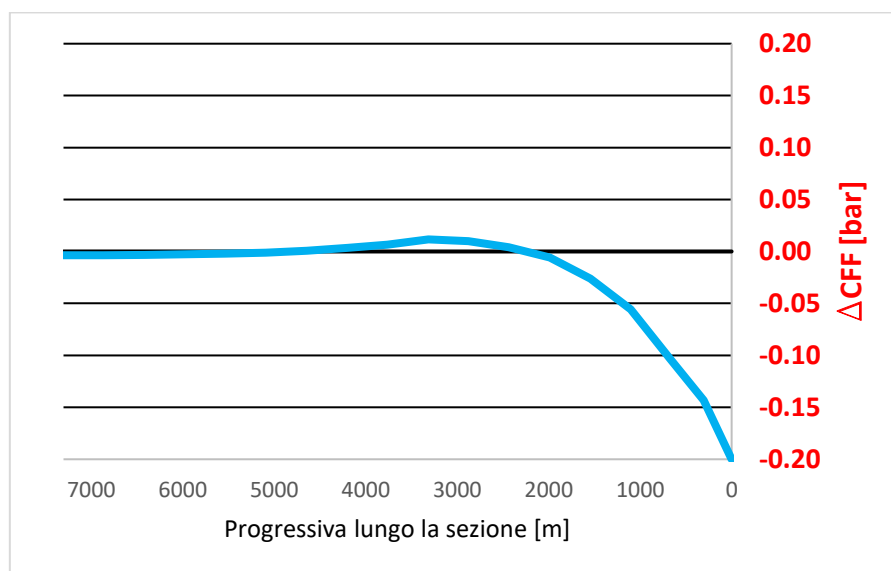


Figura 19: Particolare di Figura 18: variazione massima di CFF [bar] lungo la sezione B-B di Figura 3, ortogonale alla ACBT Deep, durante la coltivazione del campo.

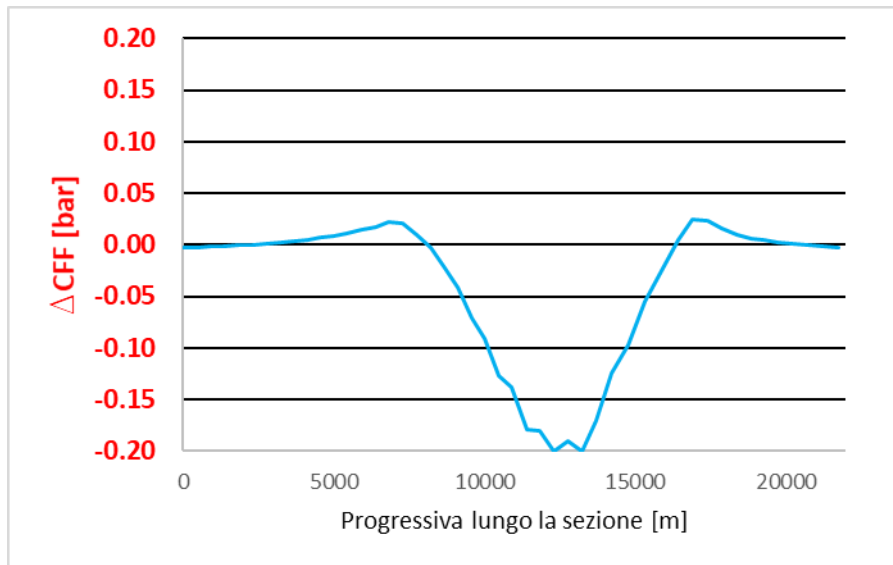


Figura 20: Variazione massima di CFF [bar] lungo il bordo CI-C2 della ACBT Deep riportato in Figura 17, durante la coltivazione del campo.

4 CONCLUSIONI

In questo progetto è stato messo a punto e applicato un modello geomeccanico agli elementi finiti ed elementi di interfaccia per la previsione del disturbo tensionale indotto dalla coltivazione del campo di Colle Santo da una profondità di -5'000 m s.l.m.m. a una profondità di -20'000 m s.l.m.m.. Il modello è stato sviluppato, dietro specifica richiesta di CMI Energia, a partire dal modello preparato da DREAM in termini di: estensione areale, caratterizzazione geomeccanica e variazione massima dello stato tensionale indotta dalla coltivazione. In particolare, la forzante applicata a questo modello è stata calcolata a partire dalle reazioni vincolari esplicitate dal bottom del modello di DREAM. La qualità e l'attendibilità dei risultati numerici ottenuti in questa attività sono subordinate alla qualità e l'attendibilità del modello DREAM. Una valutazione critica dei risultati prodotti dal modello di DREAM non è stata oggetto della presente attività.

Date queste premesse, i risultati ottenuti in questa attività possono essere così sintetizzati:

- la variazione di tensione indotta dalla coltivazione del campo di Colle Santo è inferiore a 0.05 bar (50 millibar) a profondità maggiori di 15 km.
- le variazioni di tensione sulla sorgente sismogenetica ACBT Deep sono numericamente poco apprezzabili in confronto alle tensioni iniziali: in termini percentuali, le variazioni massime sono pari allo 0.01% e 0.33% delle tensioni iniziali, rispettivamente per la tensione normale e tangenziale. Inoltre, tali variazioni sono prevalentemente di stabilizzazione (ΔCFF negativo), con valore minimo di ΔCFF pari a -0.2 bar (200 millibar). Il valore massimo di destabilizzazione (ΔCFF positivo) è pari a 0.025 bar (25 millibar).

5 REFERENZE

- DREAM (2016). Campo di Colle Santo - Studio della subsidenza indotta dalla futura produzione del campo. Relazione Tecnica.
- DREAM (2017). Campo di Colle Santo – Integrazione al quadro geomeccanico. Relazione Tecnica.
- Franceschini, A., Ferronato, M., Janna, C., Teatini, P. (2016). A novel Lagrangian approach for the stable numerical simulation of fault and fracture mechanics. *J. of Computational Physics*, 341, 503-521.
- Jha, B., and R. Juanes (2014), Coupled multiphase flow and poromechanics: A computational model of pore pressure effects on fault slip and earthquake triggering, *Water Resour. Res.*, 50, 3776–3808, doi:10.1002/2013WR015175.
- Juanes, R., B. Jha, B. H. Hager, J. H. Shaw, A. Plesch, L. Astiz, J. H. Dieterich, and C. Frohlich (2016), Were the May 2012 Emilia-Romagna earthquakes induced? A coupled flow-geomechanics modeling assessment, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 6891–6897, doi:10.1002/2016GL069284.
- Scrocca, D. (2018). Istanza di Concessione di Coltivazione di Idrocarburi “Colle Santo” – Quadro sismotettonico e Sismicità Indotta. Relazione Tecnica.
- Si, H. (2008). Adaptive tetrahedral mesh generation by constrained Delaunay refinement, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 75, 856-880.