

# **Rapporto Tecnico**

## **Istanza di Concessione di Coltivazione di Idrocarburi “Colle Santo”**

### **Integrazione al Quadro Sismotettonico e Sismicità Indotta**

**Dott. Davide Scrocca**

A handwritten signature in blue ink, reading "Davide Scrocca". The signature is fluid and cursive, with a long horizontal stroke at the end.

**Dicembre 2019**

Questa nota rappresenta una integrazione al rapporto tecnico "Quadro sismotettonico e sismicità indotta" relativo all'Istanza di Concessione di Coltivazione di Idrocarburi "Colle Santo" (Scrocca, 2018). Tale integrazione è stata sviluppata per discutere le implicazioni sismotettoniche dei risultati del recente studio "Analisi integrative del disturbo tensionale indotto dalla coltivazione del giacimento di Colle Santo" elaborato dalla società M3E (2019).

Lo studio della M3E ha valutato la propagazione del disturbo tensionale efficace a profondità comprese tra -5000 m e -20000 m s.l.m.m sulla base del modello geomeccanico sviluppato in precedenza dalla DREAM (2016, 2017) sino a profondità di -5000 m. In particolare, con questo nuovo modello M3E (2019) ha potuto valutare il disturbo tensionale indotto dalla coltivazione del giacimento di Colle Santo sulla sorgente sismogenetica ITCS078 "Abruzzo Citeriore Basal Thrust Deep" (DISS Working Group, 2018), nel seguito definita per brevità Deep ACBT, posta a profondità maggiori di quelle considerate nello studio originario della DREAM.

Di conseguenza, l'affidabilità della discussione sviluppata nel seguito di questa integrazione è condizionata dalla qualità ed attendibilità del modello originario della DREAM (2016, 2017) e del nuovo modello sviluppato da M3E (2019), che non è stato però possibile valutare criticamente in questa sede.

Per gli obiettivi di questa nota è opportuno tenere presente che, poiché con i dati disponibili non è possibile definire quanto prossimo sia lo stato tensionale di una determinata porzione della faglia al suo criterio di rottura, non è possibile determinare in valore assoluto quanto debba essere grande una perturbazione tensionale affinché tale criterio di rottura venga raggiunto, o superato, innescando un potenziale evento sismico.

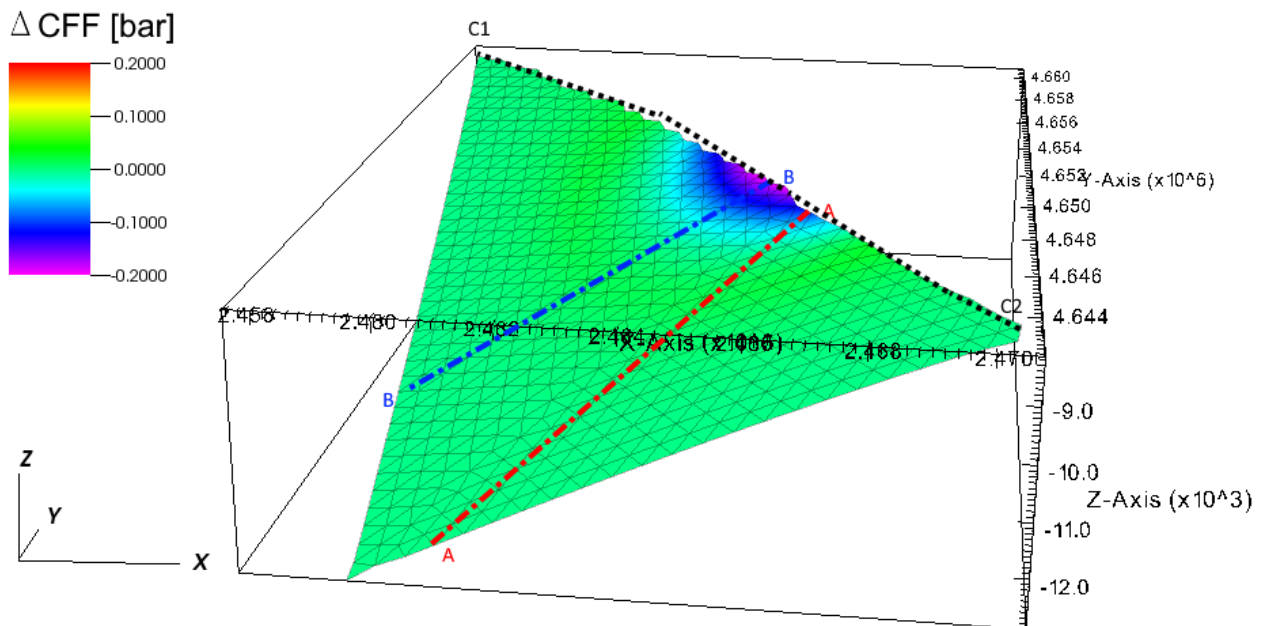
D'altra parte, come ampiamente documentato nella letteratura scientifica internazionale anche per i recenti eventi sismici del 2012 in Emilia Romagna (e.g., Reasenberg and Simpson, 1992; Jha and Juanes, 2014; Astiz et al., 2014; INGV, 2014; Juanes et al., 2016), è però possibile valutare come un determinato stato di perturbazione contribuisca o meno al meccanismo di rottura, e quindi ad un eventuale innesco di un evento sismico, tramite la valutazione della variazione del criterio di rottura, ovvero tramite la cosiddetta Coulomb Failure Function,  $\Delta CFF$ .

Seguendo tale approccio, il modello geomeccanico elaborato dalla M3E (2019) valuta la propagazione in profondità e sulla ACBT Deep del disturbo tensionale indotto dalla coltivazione del giacimento, e quindi la relativa Coulomb Failure Function  $\Delta CFF$ , considerando come riferimento lo "scenario C" definito da DREAM (2016, 2017), che prevede la massima variazione delle tensioni indotta in profondità (dopo 15 anni di produzione con 4 pozzi di sviluppo). In tale analisi, la Coulomb Failure Function,  $\Delta CFF$  è definita per la sorgente sismogenetica ACBT, che dal punto di vista tettonico è associata ad un sovrascorrimento (DISS Working Group, 2018), come di seguito specificato:

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

dove  $\Delta\tau$  è la variazione del valore di sforzo di taglio in direzione up-dip (negativa se scarica la tensione tangenziale generata dai processi tettonici in regime compressivo ovvero con effetto stabilizzante),  $\mu=0.6$  è il coefficiente di attrito (corrispondente a circa  $30^\circ$ ), e  $\Delta\sigma_n$  è la variazione di tensione efficace normale alla superficie di faglia (negativa se di compressione, ovvero con effetto stabilizzante). In definitiva, un valore di  $\Delta CFF$  negativo risulta quindi avere un effetto stabilizzante rispetto al meccanismo di rottura tipico di un sovrascorrimento (i.e., il tipo di faglia che corrisponde alla sorgente sismogenetica ACBT), mentre un valore positivo indica un effetto destabilizzante. I risultati del modello numerico della M3E (2019) sono rappresentati graficamente nelle tre figure riportate di seguito.

La figura 1 offre una visualizzazione 3D della distribuzione del disturbo tensionale indotto dalla coltivazione del giacimento di Colle Santo sulla sorgente sismogenetica ACBT Deep, espresso come Coulomb Failure Function ( $\Delta CFF$ ) secondo il modello numerico elaborato da M3E (2019).



*Figura 1 – Visualizzazione 3D del disturbo tensionale indotto dalla coltivazione del giacimento di Colle Santo sulla sorgente sismogenetica ITCS078 "Abruzzo Citeriore BasalThrust Deep" (abbreviato Deep ACBT in questa nota), espresso come Coulomb Failure Function ( $\Delta CFF$ ), secondo il modello numerico elaborato da M3E (2019). I valori negativi di  $\Delta CFF$  (tonalità di colore dal viola all'azzurro) indicano un effetto stabilizzante. Sono inoltre rappresentate le tracce della sezione BB, rappresentata in figura 2, e della sezione C1-C2, corrispondente al bordo superiore della sorgente Deep ACBT, illustrata in figura 3.*

La figura 2 mostra invece la variazione della Coulomb Failure Function ( $\Delta CFF$ ) sulla superficie della sorgente sismogenetica Deep ACBT lungo la sezione BB passante per il centro del campo e ortogonale alla Deep ACBT.

### Variazione del criterio di rottura $\Delta CFF$ lungo la sezione BB.

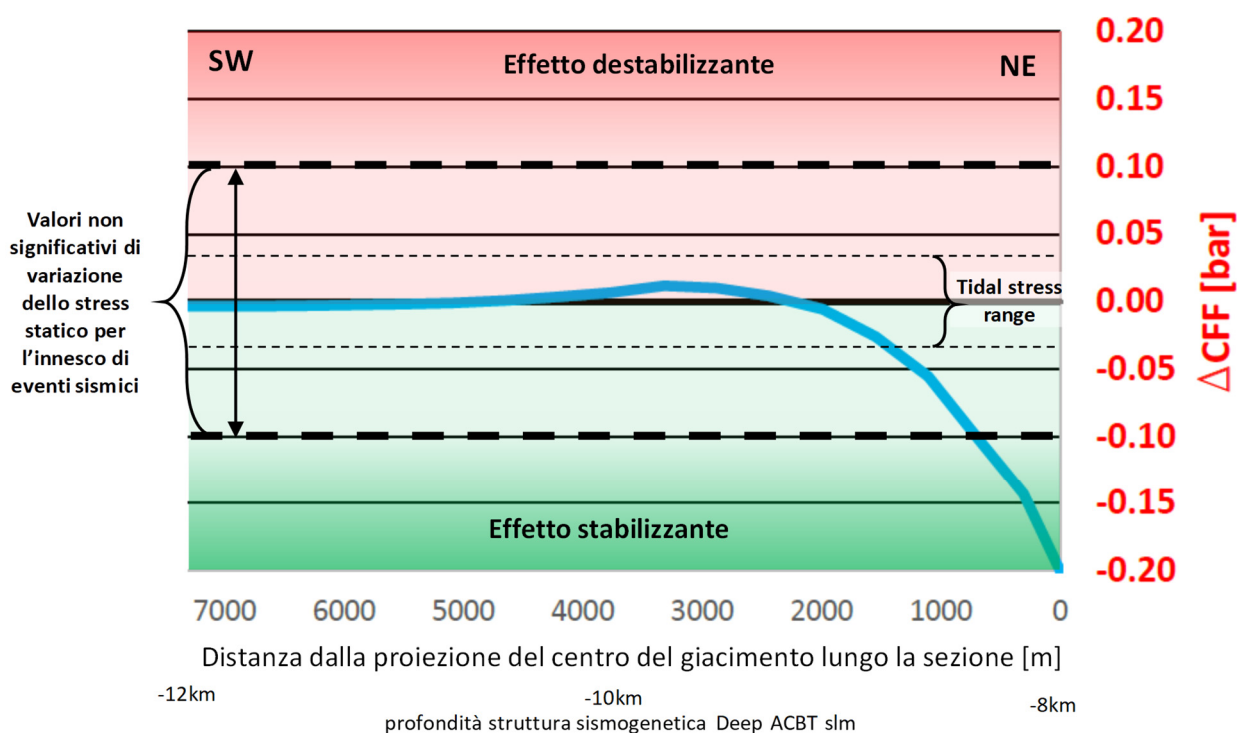


Figura 2 – Variazione della Coulomb Failure Function ( $\Delta CFF$ ) sulla superficie della sorgente sismogenetica Deep ACBT lungo la sezione BB passante per il centro del campo (traccia indicata in figura 1), secondo il modello numerico elaborato da M3E (2019). Sono evidenziate le variazioni dello stress di Coulomb prodotto periodicamente dalle maree della terra solida (tidal stress) causate dall'attrazione luni-solare (e.g., Vidale et al., 1998; Stein, 1999) e le soglie considerate significative per l'innescio di eventi sismici (e.g., Hardebeck et al., 1998; Toda et al., 1998; Stein, 1999; Lorenzo-Martín et al., 2006; Astiz et al. 2014; INGV, 2014).

Infine, la figura 3 illustra la variazione della Coulomb Failure Function ( $\Delta CFF$ ) lungo il bordo superiore della sorgente sismogenetica Deep ACBT.

Da tali risultati è possibile desumere che la struttura sismogenetica Deep ACBT viene interessata da variazioni tensionali che comportano un effetto stabilizzante (che tende ad inibire lo scorrimento sulla superficie della faglia) nella sua porzione più prossima al giacimento, a circa 8 km di profondità. Il valore minimo di  $\Delta CFF$ , con effetto stabilizzante con valore di -0,200 bar (-200 millibar), si ha nel punto più prossimo al giacimento. L'effetto stabilizzante decresce allontanandosi dal punto di massimo, fino ad invertirsi nel segno e manifestare un piccolo effetto destabilizzante dopo circa 3 km, con un valore massimo di  $\Delta CFF$  di 0,025 bar (25 millibar). Allontanandosi ancora il segno cambia nuovamente per tornare a manifestare nuovamente un ancor più piccolo effetto stabilizzante, con valori assoluti asintotici al valore nullo.

### Variazione del criterio di rottura $\Delta CFF$ lungo la sommità di Deep ACBT

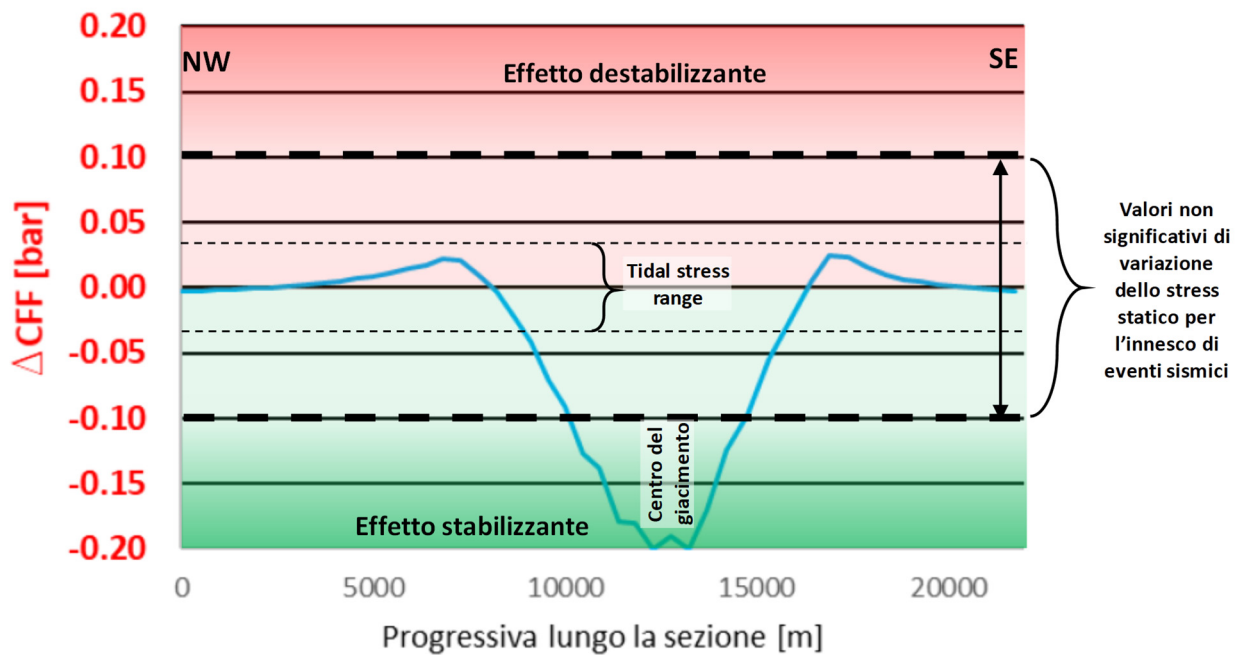


Figura 3 – Variazione della Coulomb Failure Function ( $\Delta CFF$ ) lungo il bordo superiore della sorgente sismogenetica Deep ACBT (traccia C1-C2 in figura 1), secondo il modello numerico elaborato da M3E (2019). Sono evidenziate le variazioni dello stress di Coulomb prodotto periodicamente dalle maree della terra solida (tidal stress) causate dall'attrazione luni-solare (e.g., Vidale et al., 1998; Stein, 1999) e le soglie considerate significative per l'innescio di eventi sismici (e.g., Hardebeck et al., 1998; Toda et al., 1998; Stein, 1999; Lorenzo-Martín et al., 2006; Astiz et al. 2014; INGV, 2014).

L'entità delle perturbazioni del disturbo tensionale indotto dalla coltivazione del giacimento di Colle Santo sulla sorgente sismogenetica ACBT Deep valutate dalla M3E (2019), espresso come Coulomb Failure Function ( $\Delta CFF$ ) può essere apprezzate alla luce degli studi sul tema della sismicità indotta e/o innescata non solo da cause antropiche ma anche naturali (tra molti altri, Harris, 1998; Stein, 1999; Freed, 2005; Steacy et al., 2005; National Research Council, 2013; Grigoli et al., 2017; Foulger et al., 2018).

Infatti, è ormai assodato che forti terremoti possono alterare lo stato di stress che agisce sulle faglie presenti nei settori crostali adiacenti con processi fisici che agiscono su scale spaziali e temporali differenti; tra questi, quelli principali sono relativi alle variazioni dello stress dinamico e statico ed al rilassamento viscoelastico post-sismico della crosta inferiore e del mantello. Tali processi possono produrre sia aumenti che diminuzioni del campo di stress locale che possono innescare (o anche ritardare) altri terremoti nelle zone circostanti.

Sebbene sia oggetto di dibattito scientifico l'esistenza di una soglia al di sotto della quale gli effetti di innesco di eventi sismici diventino trascurabili (e.g., Ziv & Rubin, 2000; Ogata, 2005), si ritiene in genere che perturbazioni minori di circa 0,1 bar dello stress statico di Coulomb non

siano significative ai fini dell'innesco di eventi sismici (e.g., Hardebeck et al., 1998; Toda et al., 1998; Stein, 1999; Lorenzo-Martín et al., 2006). Tale approccio è stato anche ultimamente applicato nello studio sui recenti eventi sismici del 2012 in Emilia Romagna (Astiz et al. 2014; Juanes et al., 2016), validato da INGV (INGV, 2014).

In definitiva, la variazione di stress tensionale valutata da M3E (2019) sulla base dello "scenario C" di sviluppo del giacimento Colle Santo (massimo disturbo tensionale dopo 15 anni di produzione con 4 pozzi di sviluppo) definito da DREAM (2016) genera un effetto stabilizzante massimo che raggiunge -0,200 bar nella zona più vicina al giacimento. Effetti destabilizzanti si manifestano solo in una regione più lontana e con un'entità massima di soli 0,025 bar, inferiore alla soglia generalmente considerata significativa ai fini dell'innesco di eventi sismici (e.g., Hardebeck et al., 1998; Toda et al., 1998; Stein, 1999; Lorenzo-Martín et al., 2006; Astiz et al. 2014) e comparabile con le variazioni dello stress di Coulomb prodotte periodicamente dalle maree della terra solida causate dall'attrazione luni-solare e valutabili in circa 0,01-0,03 bar (i.e., Vidale et al., 1998; Stein, 1999).

## Bibliografia

- Astiz, L., Dieterich, J. H., Frohlich, C., Hager, B. H., Juanes, R., & Shaw, J. H. (2014). The Potential for Induced Seismicity at the Cavone Oilfield: Analysis of Geological and Geophysical Data, and Geomechanical Modeling, 139 pp., Rapporto Tecnico del Laboratorio di monitoraggio Cavone, <http://labcavone.it/documenti/32/allegatrapporto-studiogiacimento.pdf>.
- DISS Working Group (2018). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.
- DREAM (2016). Campo di Colle Santo - Studio della subsidenza indotta dalla futura produzione del campo. Relazione Tecnica.
- DREAM (2017). Integrazioni al quadro geomeccanico (punti 21b e 21c), Allegato H. Integrazioni del 20/11/2017.
- Foulger, G. R., Wilson, M. P., Gluyas, J. G., Julian, B. R., & Davies, R. J. (2018). Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, 178, 438-514.
- Freed, A. M. (2005). Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, 335-367.
- Grigoli, F., Cesca, S., Priolo, E., Rinaldi, A. P., Clinton, J. F., Stabile, T. A., Dost, B., Fernandez, M.G., Wiemer, S., & Dahm, T. (2017). Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: A European perspective. *Reviews of Geophysics*, 55(2), 310-340, doi:10.1002/2016RG000542.
- Hardebeck, J. L., Nazareth, J. J., & Hauksson, E. (1998). The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10), 24427-24437, doi:10.1029/98JB00573.
- Harris, R. A. (1998). Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10), 24347-24358.
- INGV (2014). Analisi del rapporto "On the potential for induced seismicity at the Cavone oilfield: analysis of geological and geophysical data, and geomechanical modeling" di L. Astiz, J.H. Dieterich, C. Frohlich, B.H. Hager, R. Juanes e J.H. Shaw., Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 18 Luglio 2014.
- Jha, B., & Juanes, R. (2014), Coupled multiphase flow and poromechanics: A computational model of pore pressure effects on fault slip and earthquake triggering, *Water Resources Research*, 50, 3776-3808, doi:10.1002/2013WR015175.
- Juanes, R., Jha, B., Hager, B. H., Shaw, J. H., Plesch, A., Astiz, L., Dieterich J. H., & Frohlich, C. (2016). Were the May 2012 Emilia-Romagna earthquakes induced? A coupled flow-geomechanics modeling assessment. *Geophysical Research Letters*, 43, 6891-6897, doi:10.1002/2016GL069284.
- Lorenzo-Martín, F., Roth, F., & Wang, R. (2006). Elastic and inelastic triggering of earthquakes in the North Anatolian Fault zone. *Tectonophysics*, 424(3-4), 271-289.
- M3E (2019). Analisi integrative del disturbo tensionale indotto dalla coltivazione del giacimento di Colle Santo. Relazione Tecnica.
- National Research Council (2013). *Induced Seismicity Potential in Energy Technologies*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13355>.
- Ogata, Y. (2005). Detection of anomalous seismicity as a stress change sensor. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B5), 1-14.

- Reasenber, P. A. & Simpson, R. W. (1992), Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake, *Science*, 255, 1687–1690.
- Scrocca, D. (2018). Istanza di Concessione di Coltivazione di Idrocarburi "Colle Santo" – Quadro sismotettonico e Sismicità Indotta. Relazione Tecnica.
- Stacy, S., Gombert, J., & Cocco, M. (2005). Introduction to special section: Stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B5).
- Stein, R. S. (1999). The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*, 402(6762), 605.
- Toda, S., Stein, R. S., Reasenber, P. A., Dieterich, J. H., & Yoshida, A. (1998). Stress transferred by the 1995 Mw= 6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10), 24543-24565.
- Vidale, J. E., Agnew, D. C., Johnston, M. J., & Oppenheimer, D. H. (1998). Absence of earthquake correlation with Earth tides: An indication of high preseismic fault stress rate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10), 24567-24572, doi:10.1029/98JB00594.
- Ziv, A., & Rubin, A. M. (2000). Static stress transfer and earthquake triggering: No lower threshold in sight?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B6), 13631-13642.