



Engineering  
Management  
Contracting

ENGEA  
CONSULTING

ISAMGEO



# CONSIDERAZIONI SUL MODELLO GEOMECCANICO: SUBSIDENZA E SLIP-TENDENCY

## Appendice I Parte 1 del SIA

### IMPIANTO SMALL SCALE LNG PLANT

Collesanto gas field

-	01	28/11/2023	EMISSIONE PER ENTI	ISAMGEO	ITF Cosmep	ITF Cosmep
-	00	20/11/2023	EMISSIONE PER ENTI	ISAMGEO	ITF Cosmep	ITF Cosmep
Status	Rev. n.	Data	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato



Engineering  
Management  
Contracting



## INDICE

1. Sintesi non tecnica .....	3
2. Dettagli tecnici .....	5
3. Step successivi.....	10
Bibliografia.....	12

## 1. Sintesi non tecnica

Il modello geomeccanico segue i modelli statico e dinamico del giacimento di Colle Santo e ne utilizza gli output per simulare come la produzione di idrocarburi possa impattare:

- in superficie in termini di subsidenza, con le relative implicazioni in particolare per la diga di Bomba ed i corpi di frana
- sulla stabilità delle faglie che bordano il giacimento, che può essere potenzialmente alterata dalla variazione del campo di sforzo sia in positivo (aumento della stabilità) che negativo.

I risultati così ottenuti andranno a rispondere alle seguenti richieste della Sottocommissione VIA espresse nel parere 601:

*Caratterizzazione delle relazioni tra il giacimento di gas, l'acquifero presente nell'area e il loro comportamento simulato in funzione di vari scenari di produzione, con stima della associata subsidenza e dei meccanismi di ripressurizzazione potenziali (Parere CTVIA n. 601 del 14 novembre 2022 – Pag. 29)*

*Valutazione degli effetti della subsidenza innescata dalla estrazione del gas sulla stabilità della diga di Bomba con adeguata modellistica e scenari di simulazione.*

Il modello geomeccanico, in fase di realizzazione tramite software di simulazione agli elementi finiti, rappresenta l'intera area di interesse tramite una mesh 3D, che consente un elevato grado di accuratezza nella ricostruzione delle geometrie di interesse. Le fasi di lavoro volte alla sua realizzazione possono essere così sintetizzate:

1. raccolta e analisi dei dati disponibili nell'area di studio per definire i parametri geomeccanici principali e lo stato di stress in-situ;
2. creazione di una mesh 3D partendo dal modello statico di giacimento;
3. inizializzazione del modello geomeccanico, definizione delle proprietà tenso-deformative dei materiali;
4. simulazione della variazione del campo di sforzo nei vari scenari fluido-dinamici; in questa fase verranno analizzati diversi scenari di supporto dell'acquifero laterale, con conseguente ripressurizzazione (o meno) dei livelli prodotti;
5. stima della subsidenza e della compattazione indotta dalla produzione di gas;
6. analisi di stabilità delle faglie e identificazione delle eventuali zone critiche.

In questa prima fase è stato visionato il materiale disponibile per l'area di studio, costituito da prove di laboratorio effettuate da AGIP sui campioni prelevati in pozzo, precedenti studi geomeccanici (studi AGIP 1986, 1989 e 1990, Woodward-Clyde 1997, Geocomp 2008, Dream 2016), dati di letteratura (tra cui Lavecchia et al. 2007, Patacca et al. 2008, Calamita et al. 2009, Pomposo and Pizzi 2009, Visini et al. 2010) e dati pubblici derivanti dal database nazionale degli indicatori di stress (IPSI) e dalla World Stress Map (WSM).

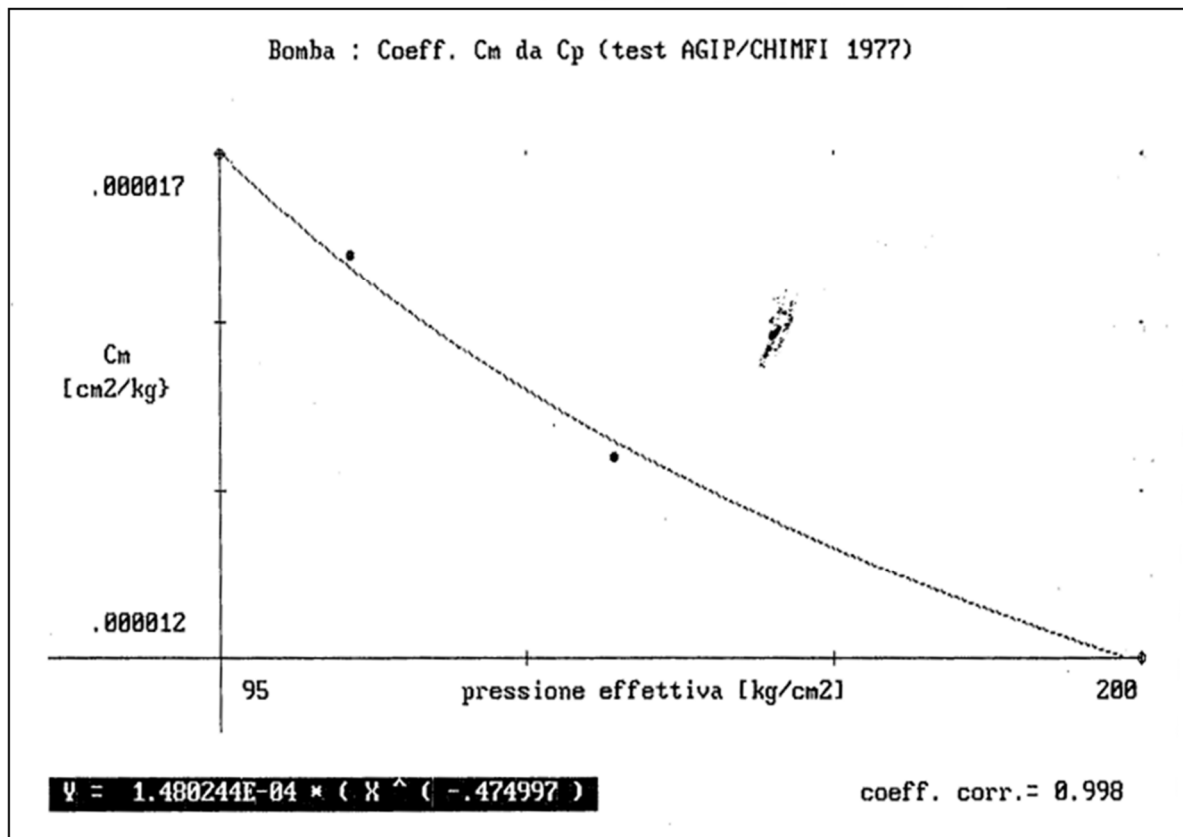
L'analisi di questo materiale permette di definire le proprietà meccaniche dei materiali e del campo di sforzo in-situ, informazioni e dati che saranno utilizzati per il modello 3D agli elementi finiti.

Una delle prime conclusioni derivante da questo screening iniziale è che non esiste un completo consenso su quale sia il regime di stress dell'area. Sarà dunque necessario nelle simulazioni considerare almeno due scenari distinti, basandosi sui dati di letteratura, per coprire l'incertezza e riuscire a considerare anche casi più cautelativi in termini di impatto della subsidenza e della stabilità delle faglie.

## 2. *Dettagli tecnici*

La modellistica geomeccanica richiede in ingresso una serie di informazioni che sono di cruciale importanza per ottenere risultati affidabili. Tra questi particolare attenzione deve essere posta, in fase di creazione del modello, ai parametri meccanici, ovvero alla rigidità e comportamento (deformabilità) delle rocce serbatoio e degli strati di copertura al variare dello sforzo efficace.

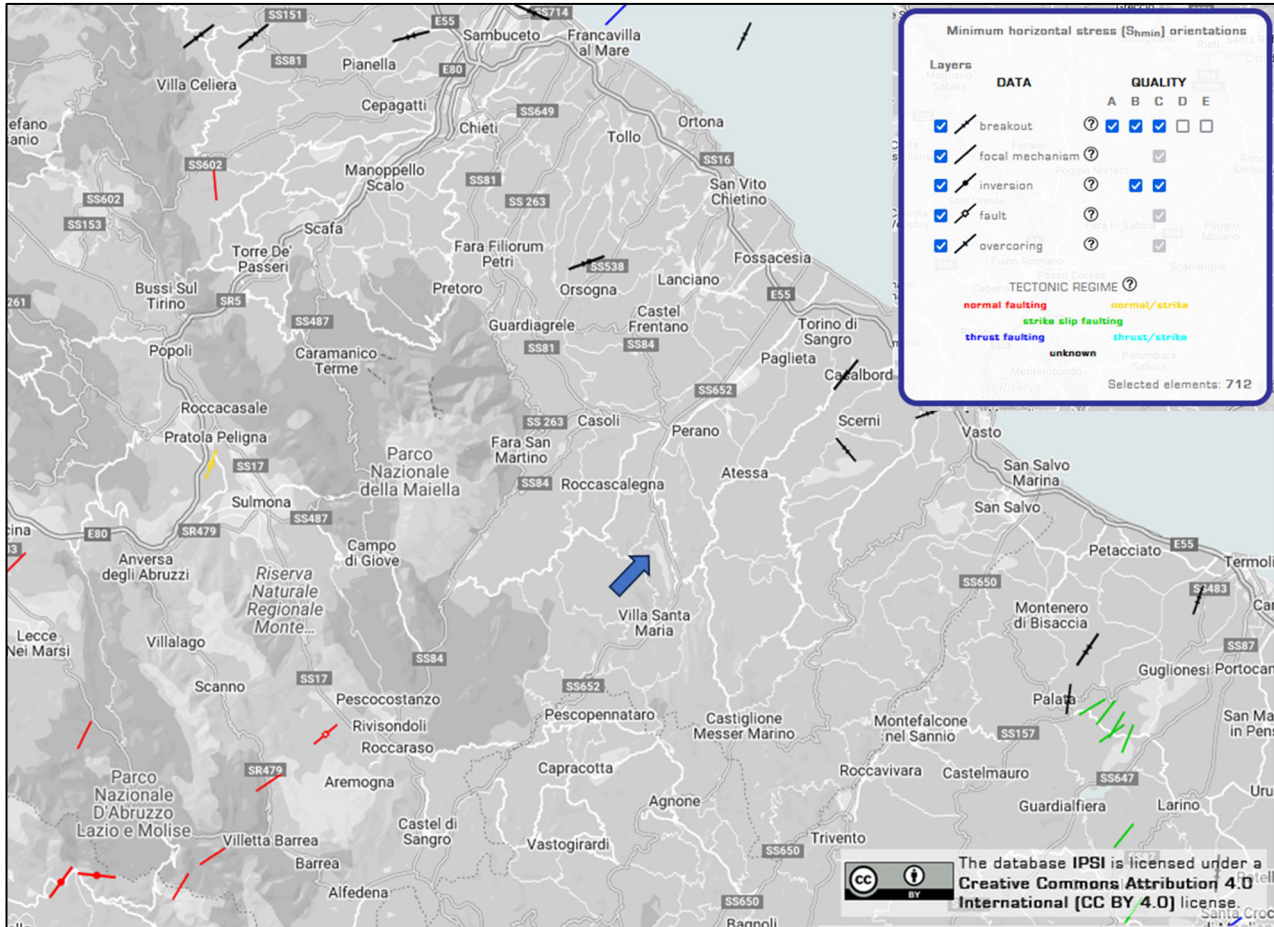
Tra il materiale raccolto, ci sono a questo scopo i risultati di una serie di test di laboratorio, presumibilmente effettuati in condizioni edometriche (deformazione laterale impedita). Sono riportati sia i valori di compressibilità uniassiale ( $C_m$ ) sia la variazione della compressibilità in funzione dello sforzo efficace. Un esempio di tali risultati ricavato da AGIP (1989) è riportato in **Figura 1**. È interessante notare il comportamento non-lineare del materiale al crescere dello sforzo efficace (“pressione effettiva”) che indica la necessità di utilizzare un modello costitutivo elasto-plastico nella modellistica numerica. A questo scopo è stato dunque scelto di utilizzare il modello Cam-Clay, ben noto in letteratura ed ampiamente utilizzato per studi di subsidenza nel bacino dell’Adriatico, ed i cui parametri verranno calibrati ad hoc per questo studio utilizzando i dati disponibili dai test di AGIP ed ulteriori dati di letteratura, in particolare per i livelli di copertura. Poiché, nonostante i dati disponibili, l’incertezza resta in ogni caso piuttosto elevata, verranno definiti 3 scenari di compressibilità, uno scenario ritenuto più probabile, e due scenari limite con compressibilità delle rocce maggiore e minore dello scenario di riferimento.



**Figura 1:** esempio di grafico riportante i valori di compressibilità uniaassiale ( $C_m$ ) in funzione dello stress efficace misurati in laboratorio sui campioni di calcari prelevati dai pozzi di Bomba alla profondità del giacimento (AGIP, 1989)

In aggiunta ai parametri meccanici delle rocce, lo stato di sforzo iniziale gioca un ruolo molto importante, sia perché regola in parte la compressibilità (che come appena detto ha un comportamento non-lineare rispetto all'entità dello sforzo efficace iniziale, in condizioni vergini), sia perché l'orientazione del tensore di sforzo, e il rapporto relativo tra le varie componenti controllano la stabilità delle faglie.

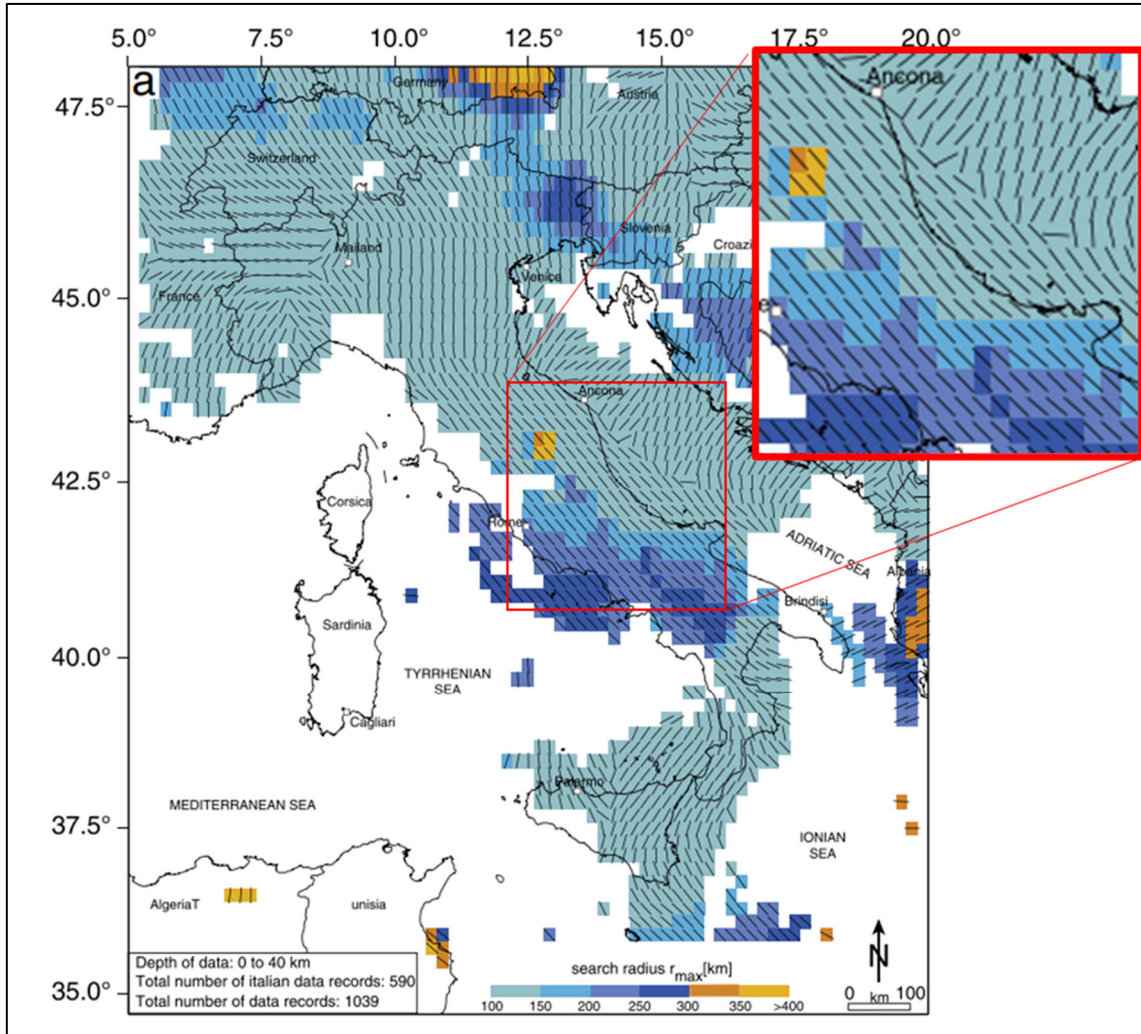
Non esistono per quanto di nostra conoscenza misure dirette dello stato di sforzo in corrispondenza dei pozzi della concessione di Collesanto. Riguardo questo aspetto, il materiale presente in letteratura è piuttosto limitato ed i dati più vicini misurati in pozzo (da breakout) o tramite l'analisi di terremoti (inversione dei meccanismi focali) sono a diverse decine di chilometri di distanza. A questo riguardo è stato consultato in particolare il database IPSI (<https://ipsi.rm.ingv.it/>, Mariucci e Montone, 2020, 2022; Montone e Mariucci, 2016), mantenuto da INGV, il cui contenuto per la zona di interesse è mostrato in **Figura 2**. In questa mappa, i marker a forma di linea indicano l'orientazione dello stress minimo. Con l'eccezione di pochi punti, si osserva che lo stress minimo a livello regionale è orientato indicativamente in direzione SW-NE.



**Figura 2:** misure di orientazione dello stato di stress in-situ più prossime all'area della concessione di Collesanto secondo il database IPSI (<https://ipsi.rm.ingv.it/>, Mariucci e Montone, 2020, 2022; Montone e Mariucci, 2016). I marker indicano l'orientazione dello stress orizzontale *minimo*, il colore il regime tettonico (si veda legenda). La freccia blu è stata aggiunta per indicare la posizione del giacimento di Collesanto in prossimità del lago di Bomba.

Pierdominici e Heidback (2012) hanno effettuato uno studio utilizzando i dati disponibili, che sono stati analizzati in maniera statistica per valutarne la robustezza, e simulazioni numeriche. Hanno così ottenuto una stima del campo di stress su una griglia regolare di punti coprente buona parte dell'Italia (ed oltre) (**Figura 3**). Nella zona della concessione di Collesanto (inset in rosso in **Figura 3**), i risultati di questo studio sono coerenti con il database IPSI. Si osservi che in **Figura 3** i marker indicano la direzione dello stress orizzontale massimo (al contrario di **Figura 2**). Questa letteratura fornisce una ragionevole base per impostare la direzione degli stress orizzontali, ma poco dice della loro intensità, e del rapporto tra gli stress orizzontali ed il verticale. Rispetto a questi aspetti l'incertezza è maggiore, e gli studi precedenti fino a qui consultati danno poche indicazioni e in parte contraddittorie. Verrà dunque effettuata un'analisi parametrica rispetto ai diversi scenari ritenuti plausibili, sia per quanto riguarda il rapporto tra stress verticali ed orizzontali, sia per l'anisotropia degli stress orizzontali. L'entità dello stress verticale sarà calcolata considerando litologie, porosità e, dove presenti, informazioni dirette di densità nei log di pozzo disponibili.





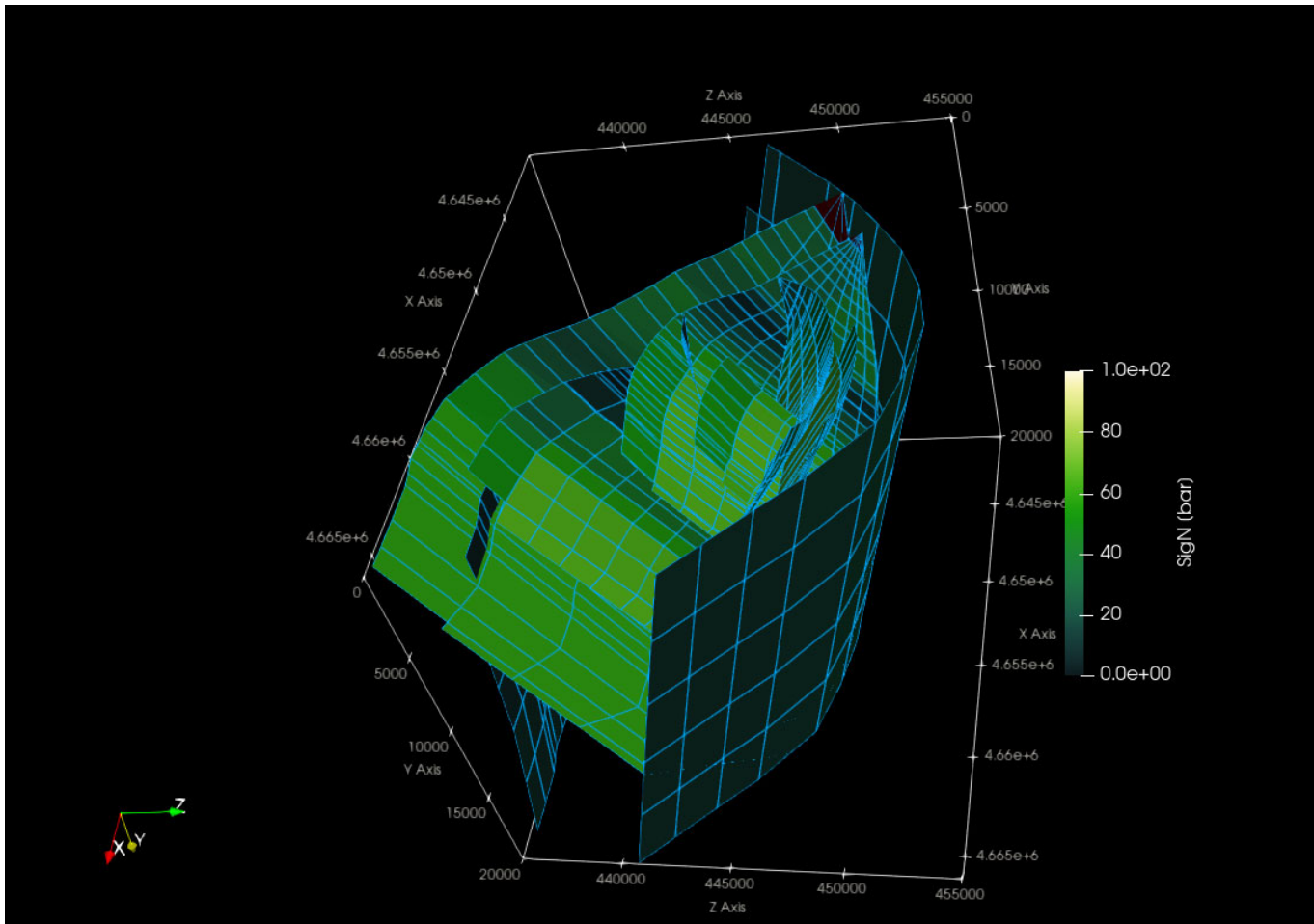
**Figura 3:** Andamento dello stress regionale calcolato su di una griglia regolare secondo Pierdominici e Heidback, 2012 (immagine modificata). I markers (linee nere) indicano l'andamento dello stress orizzontale massimo (sono cioè ruotate di 90° rispetto a quelle della figura precedente).

Il modello così inizializzato sarà utilizzato per valutare la subsidenza in superficie. A questo scopo saranno importate le pressioni dei pori calcolate nel modello dinamico, nei diversi scenari. Particolare attenzione sarà posta nell'analizzare l'impatto di un eventuale acquifero in collegamento idraulico con gli strati produttivi. La presenza o meno di questo acquifero, ed il tasso di ricarica, può sensibilmente modificare le pressioni dei fluidi in giacimento e dunque la subsidenza.

Infine, lo stesso modello geomeccanico sarà utilizzato per valutare la stabilità delle faglie che bordano il giacimento e costituiscono la struttura geologica che lo ospita. Questo sistema di faglie, come ipotizzato nel modello statico, è visualizzato in **Figura 4**. A questo scopo saranno utilizzati due indicatori chiave, tra loro collegati: la tendenza allo scivolamento ("slip tendency") e la legge di rottura di Coulomb (CFF, Coulomb Failure Function). Sarà interessante considerare il valore di questi indicatori in condizioni iniziali, per capire quanto le faglie siano vicine ad uno stato critico ("critically stressed faults") e soprattutto



l'evoluzione di questi parametri con la produzione. In particolare, in condizioni di sola produzione (senza re-iniezione di acqua di strato) l'effetto della produzione causa da un lato un aumento significativo dello stress normale alle faglie (con un effetto che stabilizza le strutture) ed un piccolo o modesto aumento degli stress di taglio. Il risultato complessivo atteso è dunque di stabilizzazione delle faglie più prossime al giacimento. Il modello numerico consentirà sia di analizzare in dettaglio l'evoluzione della slip tendency sulle faglie più prossime, sia l'effetto sulle faglie più distanti.



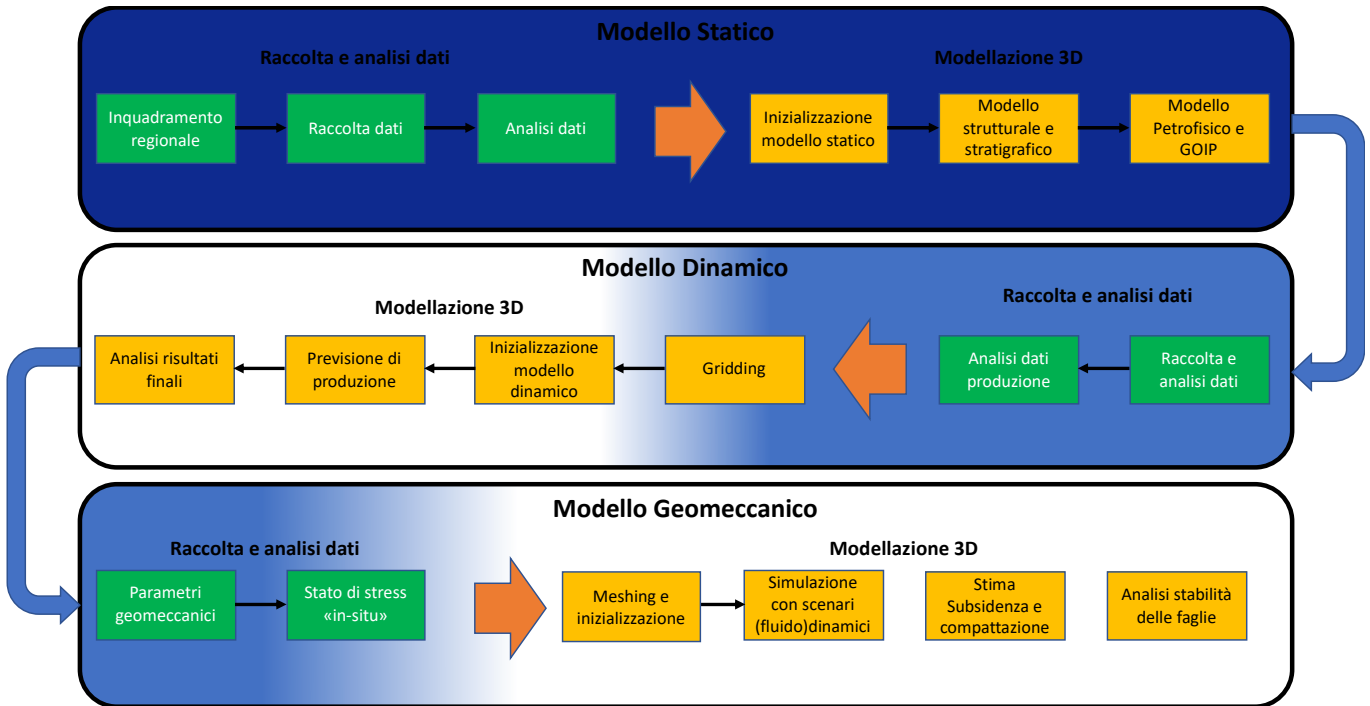
**Figura 4:** Sistema di faglie che costituisce la struttura geologica che ospita le rocce serbatoio del giacimento di Collesanto. Le faglie sono state estratte dal modello statico, e si estendono a grande distanza dal giacimento, sia in direzione orizzontale che verticale. Questo consentirà di valutare anche effetti di far-field legati alla distribuzione 3D del campo di stress. La scala di colori indica l'intensità dello stress normale alla superficie di faglia, in ciascun punto, per uno scenario di stress iniziale.

### 3. Step successivi

La fase successiva della modellizzazione geomeccanica consiste principalmente in:

- Costruzione del modello di calcolo per l'analisi FEM. Questa fase comporta la creazione della maglia di calcolo partendo dalla geometria del modello statico. Questa dovrà onorare in maniera sufficientemente accurata le strutture geologiche, i livelli del giacimento e le faglie. Il modello sarà quindi popolato utilizzando sia i risultati dell'analisi al punto precedente (stato di stress iniziale e parametri meccanici) sia i risultati del modello fluido-dinamico (campo di pressione e proprietà petrofisiche, in particolare porosità).
- Esecuzione del modello 3D FEM considerando diversi scenari. Sarà fatta una analisi di sensitività sia rispetto ai parametri fluido-dinamici (permeabilità) sia meccanici (stato di sforzo e compressibilità) all'interno del giacimento, ma anche nell'overburden e basamento. Questo consentirà di identificare lo scenario peggiore per quanto riguarda il rischio di subsidenza, che sarà usato per fornire l'entità della deformazione massima attesa in superficie ed il suo gradiente spaziale per le successive analisi sulle strutture in superficie. Questo modello dovrà essere mantenuto aggiornato nel tempo, e calibrato con dati di deformazione del suolo (da misure GPS ed InSAR) man mano che queste vengono rese disponibili durante la produzione.
- Analisi di stabilità delle faglie. Questa analisi viene eseguita analizzando la tendenza allo scivolamento in condizioni non alterate e durante la produzione. La tendenza allo scivolamento è definita dal rapporto tra lo sforzo di taglio e quello normale alla superficie di rottura. L'analisi verrà eseguita inizialmente tramite un approccio stocastico per valutare la sensitività rispetto ai parametri sconosciuti, e successivamente saranno utilizzati i risultati del modello agli elementi finiti per valutare sulle superfici tridimensionali delle faglie definite nel modello statico se ci siano regioni a rischio di riattivazione e in quale entità.

In **Figura 5** è illustrato un diagramma dell'intera modellizzazione 3D per lo sviluppo del campo di Colle Santo, e in blu è evidenziato lo stato di avanzamento del lavoro.



**Figura 5:** diagramma della modellizzazione 3D del giacimento di Colle Santo. In blu è evidenziato lo stato di avanzamento del lavoro.

## Bibliografia

- AGIP S.p.A. (1986) – Previsioni preliminari di subsidenza per il campo di Bomba (CH), San Donato Milanese.
- AGIP S.p.A. (1989) – Previsioni preliminari di subsidenza per il campo di Bomba – Nota tecnica, San Donato Milanese.
- AGIP S.p.A. (1990) – Previsioni preliminari di subsidenza per il campo di Bomba per una produzione con portate superiori a 400000 Sm<sup>3</sup>/g, San Donato Milanese.
- Calamita, F., Esestime, P., Paltrinieri, W., Scisciani, V., & Tavarnelli, E. (2009). Structural inheritance of pre- And syn-orogenic normal faults on the arcuate geometry of Pliocene-Quaternary thrusts: Examples from the Central and Southern Apennine Chain. *Bollettino Della Societa Geologica Italiana*, 128(2), 381–394. <https://doi.org/10.3301/IJG.2009.128.2.381>
- Calamita F., Satolli S., Scisciani V., Esestime P., Pace P. (2011) – Contrasting styles of fault reactivation in curved orogenic belts: examples from the Central Apennines (Italy), *Geological Society of America, Bulletin* 123 (2011), pp. 1097–1111.
- de Nardis R., Galadini F., Lavecchia G., Marcucci S., Milana G., Pace B. and Visini F.(2007). The Maiella earthquakes (Abruzzo, Italy): some insights inferred from geological and macroseismic data for seismotectonic purpose. In: 6th Italian forum of earth sciences, Rimini, 12–14 Sept 2007, abstract volume.
- DREAM, gennaio 2016. Campo di Colle Santo. Studio della subsidenza indotta dalla produzione del campo.
- Lavecchia G., de Nardis R. (2009). UR 4.01 S1-29 Seismogenic sources of major earthquakes of the Maiella area (central Italy): constraints from macroseismic field simulations and regional seimotectonics. *Convegno annuale dei progetti sismologici, Convenzione-Quadro tra Dipartimento della Protezione Civile e Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Triennio 2007-09, 19-21 October 2009, Rome, Italy.*
- Lavecchia G., de Nardis R. and Ferrarini F. (2010). Seismogenic sources of major earthquakes of the Maiella and Abruzzo foothill areas: constraints from macroseismic field simulation and regional seismotectonic data. *Poster at DPC-INGV 2007-2009 Final Meeting, Rome 30 June-2 July 2010.*
- Geocomp Corporation (2008). Predicted subsidence from gas extraction Monte Pallano field comune di Bomba (Chieti), Italy.
- Lavecchia G., de Nardis R., Visini F., Ferrarini F. and Barbano M. S. (2007). Seismogenic evidence of ongoing compression in eastern-central Italy and mainland Sicily: a comparison. *Boll. Soc. Geol. It.*, 126, 209-222.
- Mariucci M.T., Montone P., 2022. IPSI 1.5, Database of Italian Present-day Stress Indicators, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). doi:<http://doi.org/10.13127/IPSI.1.5>
- Mariucci M. T., and Montone P. (2020). Database of Italian present-day stress indicators, IPSI 1.4. *Scientific Data*, 7, 1, 298, doi: 10.1038/s41597-020-00640-w.
- Mariucci M. T., and Montone P. (2020). IPSI 1.4, Database of Italian Present-day Stress Indicators. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), <http://ipsi.rm.ingv.it/>, doi: 10.13127/IPSI.1.4.
- Montone P., Mariucci M.T., 2016. The new release of the Italian contemporary stress map, *Geophysical Journal International*, 205, 1525–1531. doi:<http://doi.org/10.1093/gji/ggw100>.

Patacca E., Scandone P., Di Luzio, E., Cavinato, G. P., & Parotto, M. (2008). Structural architecture of the central Apennines: Interpretation of the CROP 11 seismic profile from the Adriatic coast to the orographic divide. *Tectonics*, 27(3). <https://doi.org/10.1029/2005TC001917>

Pierdominici S. and Heidbach O. (2012) Stress field of Italy — Mean stress orientation at different depths and wave-length of the stress pattern, *Tectonophysics*, Vol 532–535, pp 301-311, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.02.018>.

Pomposo G., and Pizzi A. (2009). Evidenze di tettonica recente ed attiva nel settore esterno sepolto dell'Appennino centrale abruzzese. *Rendiconti online Soc. Geol. It.*, 5, 176-178. Woodward-Clyde Consultants (1997). Preliminary report Bomba Gas Field – Geotechnical evaluation of the potential for subsidence due to future gas extraction, and the potential impact on Bomba dam.

Visini, F., de Nardis R., and Lavecchia G. (2010), Rates of active compressional deformation in central Italy and Sicily: evaluation of the seismic budget. *Int. J. Earth Sci.*, 99, 1, 243-264, [10.1007/s00531-009-0473-x](https://doi.org/10.1007/s00531-009-0473-x).

IPSI, Italian present-day stress indicators (<https://ipsi.rm.ingv.it/>), visitato in data 20-11-2023.

World Stress Map (<https://www.world-stress-map.org/>), visitato in data 20-11-2023.