

CAMPO DI CORNEGLIANO

MODELLO GEOMECCANICO TRIDIMENSIONALE POLIFASICO POLICOMPONENTE PER LO STOCCAGGIO DI GAS

Relazione finale preparata per



da

Schlumberger Integrated Solutions

Schlumberger Confidential

Storico revisioni:		
Preparata da	Claudia Sorgi, Andrea Mandiuc	11/03/2018
Rivista da	Vincenzo De Gennaro, Andrea Murineddu	16/03/2018
Rivisto da	IGS	04/07/2018
Rivisto da	Andrea Murineddu	04/09/2018

Pagina vuota

TUTTI I DATI, I RISULTATI, LE INTERPRETAZIONI, LE RICERCHE, LE ANALISI, LE STIME O LE RACCOMANDAZIONI FORNITI CON I SERVIZI O ALTRIMENTI COMUNICATI DA SCHLUMBERGER AL CLIENTE IN QUALSIASI MOMENTO IN RELAZIONE AI SERVIZI SONO OPINIONI BASATE SU DEDUZIONI DA MISURE, RELAZIONI EMPIRICHE E/O IPOTESI. TALI DEDUZIONI DA MISURE, RELAZIONI EMPIRICHE E/O IPOTESI NON SONO INFALLIBILI E POSSONO NON ESSERE CONDIVISE DA ALTRI PROFESSIONISTI NEL SETTORE. PERTANTO, SCHLUMBERGER NON PUÒ GARANTIRE E NON GARANTISCE LA PRECISIONE, LA CORRETTEZZA O LA COMPLETEZZA DI TALI INTERPRETAZIONI, RICERCHE, ANALISI, DATI, RISULTATI, STIME O RACCOMANDAZIONI. IL CLIENTE RICONOSCE DI ACCETTARE I SERVIZI "COSÌ COME SONO" E CHE SCHLUMBERGER NON FORNISCE ALCUNA DICHIARAZIONE O GARANZIA, ESPLICITA O IMPLICITA, DI QUALSIVOGLIA NATURA E O ALCUNA DESCRIZIONE RIGUARDO A ESSI. NELLO SPECIFICO, IL CLIENTE RICONOSCE CHE SCHLUMBERGER NON GARANTISCE CHE QUALSIVOGLIA INTERPRETAZIONE, RICERCA, ANALISI, DATO, RISULTATO, STIMA O RACCOMANDAZIONE SIA IDONEA O IDONEO A UN DETERMINATO UTILIZZO, INCLUSA, MA NON A TITOLO ESCLUSIVO, LA CONFORMITÀ A QUALSIASI RICHIESTA GOVERNATIVA O DISPOSIZIONE NORMATIVA. IL CLIENTE, INOLTRE, RICONOSCE CHE TALI SERVIZI SONO FORNITI SUL PRESUPPOSTO E CON L'ACCORDO ESPLICITO CHE OGNI AZIONE BASATA SUI SERVIZI RICEVUTI È INTRAPRESA A PROPRIO RISCHIO E SOTTO LA PROPRIA RESPONSABILITÀ E CHE NESSUNA PRETESA RISARCITORIA PUÒ ESSERE AVANZATA CONTRO SCHLUMBERGER IN CONSEGUENZA DI TALE AZIONE.

VERSIONE ORIGINALE IN INGLESE

ANY INTERPRETATION, RESEARCH, ANALYSIS, DATA, RESULTS, ESTIMATES, OR RECOMMENDATION FURNISHED WITH THE SERVICES OR OTHERWISE COMMUNICATED BY SCHLUMBERGER TO CUSTOMER AT ANY TIME IN CONNECTION WITH THE SERVICES ARE OPINIONS BASED ON INFERENCES FROM MEASUREMENTS, EMPIRICAL RELATIONSHIPS AND/OR ASSUMPTIONS, WHICH INFERENCES, EMPIRICAL RELATIONSHIPS AND/OR ASSUMPTIONS ARE NOT INFALLIBLE, AND WITH RESPECT TO WHICH PROFESSIONALS IN THE INDUSTRY MAY DIFFER. ACCORDINGLY, SCHLUMBERGER CANNOT AND DOES NOT WARRANT THE ACCURACY, CORRECTNESS OR COMPLETENESS OF ANY SUCH INTERPRETATION, RESEARCH, ANALYSIS, DATA, RESULTS, ESTIMATES OR RECOMMENDATION. CUSTOMER ACKNOWLEDGES THAT IT IS ACCEPTING THE SERVICES "AS IS", THAT SCHLUMBERGER MAKES NO REPRESENTATION OR WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, OF ANY KIND OR DESCRIPTION IN RESPECT THERETO. SPECIFICALLY, CUSTOMER ACKNOWLEDGES THAT SCHLUMBERGER DOES NOT WARRANT THAT ANY INTERPRETATION, RESEARCH, ANALYSIS, DATA, RESULTS, ESTIMATES, OR RECOMMENDATION IS FIT FOR A PARTICULAR PURPOSE, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO COMPLIANCE WITH ANY GOVERNMENT REQUEST OR REGULATORY REQUIREMENT. CUSTOMER FURTHER ACKNOWLEDGES THAT SUCH SERVICES ARE DELIVERED WITH THE EXPLICIT UNDERSTANDING AND AGREEMENT THAT ANY ACTION TAKEN BASED ON THE SERVICES RECEIVED SHALL BE AT ITS OWN RISK AND RESPONSIBILITY AND NO CLAIM SHALL BE MADE AGAINST SCHLUMBERGER AS A CONSEQUENCE THEREOF.

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	9
2	RAPPORTO GENERALE.....	13
2.1	Inquadramento geologico.....	13
2.2	Modello tridimensionale di giacimento (statico e dinamico).....	17
2.2.1	<i>Modello statico geologico.....</i>	17
2.2.1.1	Definizione del modello strutturale.....	18
2.2.1.2	Analisi petrofisica	19
2.2.1.3	Distribuzione delle proprietà nel modello strutturale	20
2.2.2	<i>Modello dinamico.....</i>	24
2.2.3	<i>Simulazione delle operazioni di stoccaggio.....</i>	24
2.3	Introduzione al modello geomeccanico.....	26
2.4	Analisi dei singoli pozzi: obiettivi, metodologia	29
2.4.1	<i>Audit dei dati</i>	29
2.4.2	<i>Modelli geomeccanici (MEM) 1D e analisi della stabilità dei pozzi.....</i>	30
2.4.2.1	Proprietà meccaniche (elastiche e resistenza).....	30
2.4.2.2	Pressione interstiziale.....	36
2.4.2.3	Sforzo di copertura	38
2.4.2.4	Sforzi orizzontali	38
2.4.2.5	Analisi della stabilità delle perforazioni dei pozzi (WBS).....	43
2.4.3	<i>Conclusioni dell'analisi dei singoli pozzi.....</i>	44
2.5	Modellamento geomeccanica 3D	50
2.5.1	<i>Dati dei pozzi e sismici</i>	51
2.5.2	<i>Costruzione del modello geomeccanico 3D.....</i>	51
2.5.3	<i>Modellamento delle proprietà meccaniche e modellamento costitutiva</i>	52
2.5.4	<i>Modellamento delle discontinuità</i>	52
2.5.5	<i>Risultati del modellamento degli sforzi: stato iniziale.</i>	54
2.5.6	<i>Risultati del modellamento degli sforzi durante le operazioni di stoccaggio (UGS): analisi accoppiata del giacimento.</i>	70
2.5.6.1	Deformazione del giacimento durante i cicli di iniezione/produzione.....	72
2.5.6.2	Analisi dell'integrità della roccia di copertura (cap rock)	82
2.5.6.3	Analisi della stabilità delle faglie	85
2.5.6.4	Deformazione del piano di campagna (sollevamento e subsidenza)	89
2.5.7	<i>Conclusioni dell'analisi geomeccanica 3D del giacimento</i>	93



2.6	Riferimenti.....	94
-----	------------------	----

FIGURE

Figura 1. Il campo Cornegliano e l'ubicazione di altri campi nella zona (in alto). Mappa e sezione strutturale nella zona di interesse (in basso).....	16
Figura 2. Il modello statico del giacimento.....	18
Figura 3. Top della zona C2.....	21
Figura 4. Sezione longitudinale estratta dal modello 3D di porosità.....	22
Figura 5. Sezione trasversale estratta dal modello 3D di porosità	23
Figura 6. Il flusso di lavoro geomeccanico integrato	27
Figura 7. Il flusso di lavoro del modello meccanico lungo i pozzi.....	28
Figura 8. Processo di modellamento delle proprietà per definire i parametri elastici e di resistenza log wireline.	33
Figura 9. Modellamento delle proprietà del pozzo A01: Traccia 3 = GR, Traccia 4 = modulo di Young' (dinamico e statico), Traccia 5 = rapporto di Poisson, Traccia 6 = coefficiente di Biot', Traccia 7 = UCS (profilo magenta) e TSTR (resistenza a trazione, profilo blu scuro). I punti sono relativi ai risultati delle prove di laboratorio utilizzati per la calibrazione.....	34
Figura 10. Modellamento delle proprietà del pozzo B01: Traccia 3 = GR, Traccia 4 = modulo di Young' (dinamico e statico), Traccia 5 = rapporto di Poisson, Traccia 6 = coefficiente di Biot', Traccia 7 = UCS (profilo magenta) e TSTR (resistenza a trazione, profilo blu scuro). I punti sono relativi ai risultati delle prove di laboratorio utilizzati per la calibrazione.....	35
Figura 11. Misurazioni della pressione interstiziale nei pozzi A01 e B01.	37
Figura 12. Orientamento degli sforzi ottenuto dalla World Stress Map [1] e da Pierdominici et al. (2005).	40
Figura 13. Modellamento degli sforzi nel pozzo A01. I punti sono valori di calibrazione di prove MDT (pressione).	41
Figura 14. Modellamento degli sforzi nel pozzo B01. I punti sono valori di calibrazione di MDT (pressione e sforzi).....	42
Figura 15. Calcolo degli sforzi attorno alla perforazione di un pozzo ipotizzando un comportamento isotropo delle rocce.	46
Figura 16. Definizione di gradienti di tensione critici del peso dei fluidi di perforazione (MWW).	47
Figura 17. Analisi di stabilità della perforazione e del peso dei fluidi di perforazione (MWW) per il pozzo A01 del giacimento Cornegliano.....	48
Figura 18. Analisi di stabilità della perforazione e del peso dei fluidi di perforazione (MWW) per il pozzo B01 del giacimento Cornegliano.....	49
Figura 19. Orizzonti inclusi nel modello strutturale (a destra) e orizzonti principali da elenco attivo (a sinistra).	56
Figura 20. (a) Faglie incluse nel modello strutturale e (b) faglie che intersecano B1_Top e penetrano nella formazione Argille del Santerno (roccia di copertura).....	57
Figura 21. Il modello geomeccanico 3D del giacimento Cornegliano dopo l'integrazione finale.....	58

Figura 22. Confronto tra i profili MEM 1D (curve nere) e le proprietà meccaniche scalate (aree colorate) lungo il pozzo A01.....	59
Figura 23. Impedenza acustica (AI) lungo la sezione E-O passante attraverso i pozzi A01 e B01.	60
Figura 24. Correlazione tra AI e il modulo statico di Young calcolato (in alto) e il rapporto di Poisson (in basso) lungo i pozzi A01 e B01.	61
Figura 25. Modulo di Young statico 3D e rapporto di Poisson scalati utilizzando la tendenza AI come input secondario.	62
Figura 26. Le proprietà geomeccaniche 3D: (a) densità (b) modulo di Young (c) rapporto di Poisson, (d) UCS, (e) resistenza a trazione, (f) angoli di attrito, (g) angolo di dilatanza.....	63
Figura 27. Modellamento delle discontinuità.....	64
Figura 28. Piani di faglia disponibili (in alto) ed elementi faglia corrispondenti (in basso). È inoltre visibile l'elevata risoluzione orizzontale della mesh (15 m x 15 m).....	65
Figura 29. Schema di inizializzazione degli sforzi 3D (reticolo non relativo al modello del campo Cornegliano).....	66
Figura 30. Esempio di cubo di pressione interstiziale (in alto) utilizzato per il modellamento 3D degli sforzi. La figura nella parte inferiore mostra una sezione passante attraverso il giacimento (anno 2018).67	67
Figura 31. Confronto tra i principali sforzi 3D (colorati) e gli sforzi 1D del modello MEM (neri) per il pozzo A01 (a destra).....	68
Figura 32. In alto: Variazione dell'azimut e dell'entità dello sforzo orizzontale minimo in prossimità delle faglie nella zona centrale C1 del giacimento. Nota: l'orientamento dello sforzo orizzontale minimo distante dalle faglie è 110° N, in accordo alla direzione imposta sui confini del modello. In basso: sezione verticale che mostra la distribuzione degli sforzi orizzontali minimi. Si notino le variazioni in prossimità delle faglie.....	69
Figura 33. Simulazione con accoppiamento di tipo "one-way" tra il modello dinamico e il modello geomeccanico del giacimento.....	71
Figura 34. Evoluzione teorica dello stato tensionale all'interno del giacimento durante l'iniezione/la produzione.....	74
Figura 35. Variazioni della pressione durante i cicli di iniezione/produzione.....	75
Figura 36. Variazioni della pressione durante i cicli di iniezione/produzione in due zone differenti del giacimento.....	76
Figura 37. Evoluzione della pressione, dello sforzo orizzontale minimo effettivo e dello spostamento verticale su B1_Top di 4 punti differenti (punto A).....	77
Figura 38. Evoluzione della pressione, dello sforzo orizzontale minimo effettivo e dello spostamento verticale su B1_Top di 4 punti differenti (punto B).....	78
Figura 39. Evoluzione della pressione, dello sforzo orizzontale minimo effettivo e dello spostamento verticale su B1_Top di 4 punti differenti (punto C).....	79
Figura 40. Evoluzione della pressione, dello sforzo orizzontale minimo effettivo e dello spostamento verticale su B1_Top di 4 punti differenti (punto D).....	80
Figura 41. Percorsi di carico dei quattro punti alla sommità giacimento. Nota: tutti i punti restano al di sotto della zona di rottura Mohr-Coulomb (linea rossa) all'interno del campo elastico.	81

Figura 42. Variazioni degli sforzi di taglio lungo la sezione E-O passante attraverso le traiettorie dei pozzi A01 e B01.....	83
Figura 43. Deformazione plastica a taglio accumulata nello strato della roccia di copertura (cap rock) sopra B1_top dopo l'iniezione nel 2042. In tutta la roccia di copertura (cap rock) la rottura è trascurabile.....	84
Figura 44. Analisi di stabilità delle faglie nello stato iniziale svuotato a gennaio 2018 (tutte le faglie): (a) criterio di rottura di Mohr-Coulomb $\phi_{fault} = 23^\circ$; (b) resistenza allo scorrimento sulle superfici di faglia.	86
Figura 45. Analisi di stabilità delle faglie dopo l'iniezione a ottobre 2042 (tutte le faglie): criterio di rottura di Mohr-Coulomb $\phi_{fault} = 23^\circ$; (b) resistenza allo scorrimento sulle superfici di faglia.....	87
Figura 46. Deformazione plastica a taglio delle faglie dopo l'iniezione a ottobre 2042 (tutte le faglie)....	88
Figura 47. Spostamenti verticali sulla sezione dell'anticlinale E-O dopo l'iniezione a ottobre 2042.....	90
Figura 48. Spostamenti verticali sulla sezione dell'anticlinale E-O dopo la produzione ad aprile 2043... 91	
Figure 49. Spostamenti a piano campagna dopo l'iniezione a ottobre 2042 e dopo la produzione ad aprile 2043.....	92

TABELLE

Tabella 1. Sequenza stratigrafica	14
Tabella 2. Suddivisione in zone del giacimento e principali 'top' dei livelli sabbiosi.....	15
Tabella 3. Classificazione delle facies/rock-types	20
Tabella 4. Caso di pressione di ingresso del simulatore Eclipse.....	25
Tabella 5. Leggi costitutive.....	52
Tabella 6. Proprietà geomeccaniche delle faglie.....	54

1 INTRODUZIONE

L'obiettivo del presente studio è fornire informazioni relative al comportamento delle formazioni rocciose del giacimento nel campo Cornegliano. Il campo è ubicato a Cornegliano Laudense, a Sud-Ovest di Lodi. Scoperto dal precedente operatore (AGIP) nel 1951, il giacimento ha prodotto circa 2.3 Bscm (miliardi di metri cubi) di gas da 12 dei 20 pozzi perforati e completati durante fase di sviluppo e produzione che va dal 1952 al 1997. Ad oggi tutti i pozzi perforati da AGIP sono chiusi minerariamente.

Le attività di ingegneria e perforazione legate allo sviluppo del giacimento (reservoir), sono state assegnate da Ital Gas Storage (IGS), concessionario dello stoccaggio, a Schlumberger nel 2015. L'attività di perforazione è iniziata a Luglio 2016 e si è conclusa a Dicembre 2017. Da due cluster (Cluster A e Cluster B) sono stati perforati 14 pozzi. Inizialmente 10 pozzi saranno usati per lo stoccaggio di gas e 2 (1 per ogni cluster) saranno dedicati ad attività di monitoraggio. Per i restanti 2 pozzi del cluster B IGS ha chiesto e ottenuto la proroga al 2021 dei tempi di completamento rispetto a quanto previsto in concessione, per poter incorporare i risultati dei primi cicli di stoccaggio. Ciascun Cluster prevede un pozzo verticale (A01 e B01) al fine di acquisire dati che consentano una migliore caratterizzazione della roccia di copertura (cap rock) e del giacimento; i restanti pozzi sono deviati con deviazione massima compresa tra 84,5° e 88°.

Lo sviluppo del campo è stato supportato da studi volti a definire i modelli del giacimento:

- Modello statico (geologico). Rappresentazione 3D delle proprietà strutturali e petrofisiche del giacimento
- Modello dinamico. Simulazione numerica della storia produttiva e post produttiva del giacimento, integrato con simulazioni delle operazioni di stoccaggio (forecasts): cicli di iniezione/produzione in un arco di tempo corrispondente a 25 anni.
- Modello geomeccanico. Caratterizzazione delle proprietà meccaniche del giacimento e della roccia di copertura e valutazione delle variazioni di sforzi-deformazioni durante le fasi di stoccaggio.

Questo rapporto descrive la costruzione del modello geomeccanico, realizzato sulla base del modello statico, e la successiva integrazione con il modello dinamico di giacimento e le simulazioni ("one-way coupling"). Al fine di conseguire l'obiettivo sopra descritto, si è proceduto come segue:

1. Modello geomeccanico 1D (lungo il pozzo) allo stato attuale per due pozzi realizzati nel campo Cornegliano (pozzi A01 e B01).
2. Integrazione dei risultati di prove di laboratorio [1] per la calibrazione delle proprietà meccaniche.
3. Modello geomeccanico 3D del giacimento (condizioni iniziali di tensione) definito sulla base del modello statico geologico.
4. Analisi della stabilità delle perforazioni e ottimizzazione della traiettoria dei pozzi pianificati per il campo Cornegliano utilizzando i risultati forniti dal modello 3D.
5. Integrazione delle variazioni di pressione stimate nel modello dinamico 3D del giacimento per calcolare le variazioni di sforzi-deformazioni durante le operazioni di stoccaggio (fasi di iniezione/produzione con la simulazione delle attività di stoccaggio e quindi del flusso delle diverse fasi nei mezzi porosi).
6. Analisi delle condizioni necessarie per assicurare l'integrità del giacimento relativamente a:
 - a. Deformazione del giacimento, causa di sollevamento e subsidenza in superficie.
 - b. Analisi dell'integrità della roccia di copertura (cap rock).

c. Analisi della stabilità delle faglie.

I principali risultati del presente studio sono i seguenti:

- I log disponibili per i pozzi A01 e B01 (densità, GR, CAL, porosità, velocità delle onde compressionali V_p e di taglio V_s) sono stati sufficienti per il modello geomeccanico 1D, consentendo una buona copertura delle formazioni attraversate dai pozzi. I log di misurazione dei diametri (caliper) e i dati registrati durante la perforazione disponibili sono stati utilizzati per la calibrazione della stabilità delle perforazioni.
- Sono state apportate modifiche minori ai log per ricostruire intervalli non acquisiti e correggere eventuali letture errate.
- Per il modellamento delle proprietà meccaniche, sono state distinte le principali litologie utilizzando GR nonché le informazioni fornite da relazioni geologiche e di mud logging e, ai fini del calcolo di tali proprietà, per ogni litologia sono state utilizzate correlazioni specifiche.
 - La correlazione tra il modulo di Young (Young modulus) dinamico e statico è stata calibrata con valori ottenuti da prove di laboratorio laddove disponibili (roccia di copertura e giacimento) e utilizzando valori di riferimento reperibili in letteratura (per le formazioni più superficiali rispetto alla copertura).
 - La correzione per la conversione del rapporto di Poisson (Poisson's Ratio) da dinamico a statico è stata presa in considerazione sia nelle rocce argilla-sostenute che grano-sostenute. Il Poisson's Ratio statico è stato derivato dalla sua controparte dinamica mediante calibrazione con dati di prove di laboratorio (roccia di copertura e giacimento) e utilizzando valori di riferimento reperibili in letteratura (per le formazioni più superficiali).
 - La calibrazione delle proprietà resistenza alla compressione semplice (Unconfined Compression Strength - UCS) e l'angolo di attrito (Friction Angle - FANG) nella roccia di copertura e nel giacimento è stata eseguita sulla base di valori di riferimento ottenuti da prove di laboratorio sui campioni acquisiti (carote). Per la resistenza a trazione (TSTR), in mancanza di misurazioni di laboratorio dirette, si sono ipotizzati valori derivati da statistiche e correlazioni proprietarie interne o comunque reperibili nella letteratura specifica. Nello specifico per la resistenza a trazione (TSTR) della roccia si è ipotizzato un valore pari al 10% di UCS. Nel caso di assenza di dati relativi a campioni (carote), sono state utilizzate correlazioni per l'insieme delle proprietà meccaniche, nello specifico: elastiche (modulo di Young e coefficiente di Poisson) e di resistenza (UCS, angolo di attrito e resistenza a trazione).
- Ove possibile, il modello tensionale e la pressione di formazione sono stati stimati e calibrati in maniera sistematica facendo riferimento alle misurazioni disponibili. Nello specifico: prove di pressione MDT in A01 e B01 e una prova di tensione MDT nel pozzo B01 nella roccia di copertura (cap rock) (1327 m TVD). Il modello di stabilità dei pozzi A01 e B01 è in buon accordo con le osservazioni (dati registrati durante la perforazione e misurazioni in pozzo).
- Per definire il modello geomeccanico (3D) del giacimento, sono stati utilizzati i risultati del modello geomeccanico (1D) lungo i pozzi (profili delle proprietà meccaniche, profili di pressione e di tensione) in combinazione a informazioni strutturali (interpretazione della simica 3D: superfici e faglie e modello statico). È stato eseguito un primo calcolo per stabilire le condizioni iniziali per l'intero giacimento prima delle operazioni di stoccaggio (stato reale a gennaio 2018) garantendo la coerenza con i modelli di tensione 1D precedentemente creati per i pozzi A01 e

B01. I risultati del modello 3D sono stati utilizzati anche per fornire supporto alle operazioni di perforazione al fine di confermare la stabilità dei pozzi e il peso (densità) dei fluidi (fanghi) di perforazione (Mud Weight Window - MWW) di tutti i pozzi pianificati.

- Sono state quindi prese in considerazione le variazioni della pressione indicate da simulazioni dinamiche del giacimento (simulazione delle attività di stoccaggio e quindi del flusso delle diverse fasi nei mezzi porosi) considerando 2 cicli (iniezione/produzione) all'anno. L'analisi si estende fino al 2043 (52 regimi di pressione) considerando uno schema di tipo "one-way coupling" tra il simulatore geomeccanico e quello dinamico del giacimento. In questo schema, le pressioni calcolate dal simulatore dinamico sono passate al simulatore geomeccanico che ricalcola le variazioni degli sforzi e le deformazioni delle formazioni rocciose e faglie all'interno del giacimento e nel suo intorno, valutando eventuali criticità (rotture ingestibili) per ciascuno stato tensionale associato alle variazioni di pressione. I risultati del modello sono stati utilizzati per ottenere informazioni utili sull'integrità del giacimento. Nello specifico:
 - Deformazione del giacimento durante i cicli di iniezione/produzione (ovvero sollevamento e compattazione), causa di sollevamento e subsidenza del piano campagna.
 - Analisi dell'integrità della roccia di copertura (cap rock).
 - Analisi della stabilità delle faglie.

I risultati dell'analisi geomeccanica 3D accoppiata con i cicli di pressione (iniezione/produzione) indicano che:

- Durante i cicli di pressione, non si osservano rotture nella roccia di copertura (cap rock) né nel giacimento. Le variazioni degli sforzi/deformazioni si verificano in regime elastico.
- Durante i cicli di pressione, nella maggior parte delle faglie si sono verificati movimenti elastici con condizioni lontane dalla rottura. Le faglie orientate in direzione Nord-Sud sono quelle più sollecitate.
- Le deformazioni plastiche (irreversibili) osservate solo lungo alcune delle faglie sono trascurabili (minori dello 0,01%), e quindi da un punto ingegneristico irrilevanti.
- A causa delle variazioni di pressione e della risposta delle faglie, gli sforzi si ridistribuiscono all'interno e nell'intorno del giacimento. Queste variazioni sono associate a spostamenti elastici (reversibili).
- Il sollevamento elastico del piano campagna durante ciascuna fase di iniezione (pressurizzazione) è variabile per effetto dell'eterogeneità di sforzi/deformazioni all'interno del giacimento. Il sollevamento è totalmente recuperato durante la fase di produzione.
- A fine concessione la subsidenza massima in superficie è pari a circa 2,7 cm nel centro del campo, mentre nelle zone laterali si osserva un sollevamento massimo dell'ordine di 1 cm rientrando quindi nell'ambito di valori trascurabili.

Il modello geomeccanico 3D disponibile è pronto anche per essere utilizzato per valutare la stabilità e il peso dei fluidi di perforazione (MWW) dei pozzi per qualsiasi traiettoria virtuale nell'area o per definire eventuali piani di intervento in caso di abbandono dei pozzi.

Pertanto, si raccomanda, di mantenere il modello aggiornato includendo i dati che verranno acquisiti con i monitoraggi già pianificati, nonché le eventuali nuove informazioni disponibili in futuro (dati dei

pozzi, dati di laboratorio, nuove interpretazioni geologiche/sismiche), così ottimizzandone nel tempo i risultati.

2 RAPPORTO GENERALE

2.1 Inquadramento geologico

Il campo di Cornegliano è situato nella parte ovest della Pianura Padana, pochi chilometri a sud-ovest di Lodi. Fa parte delle ben note strutture anticlinali Cornegliano-Caviaga nella zona più a ovest “dell’asse Cornegliano-Bordolano” (Pieri and Groppi, 1981). È confinato tra due faglie: la prima, più significativa, a nord con orogenesi alpina (sud-vergente) e la seconda a sud con orogenesi appenninica (nord-vergente). Come descritto da Pieri e Groppi (1981) l’asse Cornegliano-Bordolano corrisponde ad un’area di strutture anticlinali simili in direzione est-ovest: Cornegliano, Caviaga e Soresina a sud sono nord-vergenti mentre Ripalta e Bordolano a nord hanno vergenza opposta (sud-vergenti), **Figura 1**. Questa configurazione geologica è caratteristica della zona in questione, e rappresenta un’anomalia nell’ottica della geologia regionale della Pianura Padana.

Nel presente studio le informazioni geologiche di dominio pubblico sono state combinate con i risultati di uno studio sedimentologico e di un rilievo gravimetrico, eseguito nel 2017, per definire un modello geologico concettuale del campo Cornegliano. Il modello tiene conto di deformazioni tettoniche dovute all’orogenesi appenninica e di successivi riaggiustamenti, faglie ‘strike-slip’ in direzione perpendicolare.

Si presume che il giacimento, nella formazione “Sabbie di Caviaga”, si sia formato durante il Pliocene Inferiore, e che sia rappresentato da una sequenza torbidity riconducibile almeno parzialmente ad un Tipo II, vedi Mutti, 1985. Il sistema torbidity di Tipo II corrisponde a depositi transizionali di canale, vergenti verso bacino a depositi lobati. Il giacimento è parte di un’anticlinale con un’estensione di circa 6x3 chilometri con direzione sud est – nord ovest. L’influenza della direzione principale degli elementi strutturali sullo spessore dei sedimenti caratteristici nella formazione “Sabbie di Caviaga”, non è chiara perché solo alcuni pozzi hanno attraversato l’intera formazione.

Il modello geologico concettuale è stato poi confermato dall’interpretazione stratigrafica e strutturale delle formazioni del giacimento eseguita sul rilievo sismico 3D acquisito nel 2017.

Le più importanti formazioni nell’area sono descritte in **Tabella 1**. Il giacimento, ad una profondità tra i 1300m e i 1700m dal piano campagna, è caratterizzato da strati sabbiosi diffusi con intercalazioni di facies argillose, identificati come zone B, C1, C2 e C3, ed è confinato in una trappola strutturale costituita da facies argillo-marnose (Argille del Santerno) di spessore compreso tra 179 e 430 m nella parte superiore e da alcuni strati ripiegati e mineralizzati nella parte inferiore, aventi uno spessore massimo di 210 m. I pozzi esistenti hanno prodotto gas dagli intervalli sabbiosi B, C1, C2 e C3. Le zone B, C1 e C2 sono l’obiettivo per lo stoccaggio del gas. La zona C2 presenta proprietà petrofisiche migliori (permeabilità e porosità più elevate) rispetto alla zona C1 e costituisce la zona principale di stoccaggio. La **Tabella 2** sintetizza le caratteristiche delle zone del giacimento e descrive la suddivisione in livelli sabbiosi rilevati durante la fase di perforazione e riscontrati dai log dei pozzi già esistenti. La pressione iniziale del giacimento era di 161 bar a 1330 m. Al termine della produzione (1995) la pressione del giacimento riportata da AGIP (precedente operatore) era di circa 50 bar. La pressione attuale è di circa 114 bar a circa 1400 m dal piano campagna, con un gradiente effettivo di 0,36 psi/ft (0,081 bar/m) nel giacimento (da prove di pressione MDT).

Period	Formation	Main lithologies	Depth (TVDSSm) and average thickness
Olocene	Alluvione	Sd-Gr-Cl. Sand and Gravel with levels of Clay. Continental environment	85
Pliocene-Pleistocene	Sabbie di Asti Fm.	Cl-Sd-(Gr,Pt) Big levels of Sand with thin interbedding of Clay. Littoral and neritic environment.	-150 (650)
Upper Pliocene	Argille del Santerno Fm.	Cl-Mrl-(Sd) Clay and Claystone with thin interbeds of Sand, more frequent downwards. Neritic environment.	-800 (450)
Lower Pliocene	Strati di Caviaga Fm.	Sd-Sst-Cl-Mrl Sand and Sandstone with locally pebbles and levels of Claystone. Shallow neritic environment.	-1250 (150)
Aquitaniense-Tortoniano	Marne di Gallare	Mrl-Sd-Sst Marl with thin levels of Sand and Sandstone. Deep neritic environment	Not reached by drilling

Sd= Sand, Sst= Sandstone, Gr=Gravel, Cl= Clay, Mrl=Marl, Sl= Siltstone, Pt=Peat, (x)=Minor lithology

Tabella 1. *Sequenza stratigrafica*

Zone	Livelli	Osservazioni
B	B1 – Primi livelli di sabbia al di sotto della roccia di copertura	La zona B è caratterizzata da sabbie discontinue e di scarsa qualità. È sviluppata nella zona ovest del giacimento nell'area dei pozzi A04 e C10
	B2 – Corpi sabbiosi discontinue	
C1	C1a – Livelli sabbiosi nella parte superiore della zona	La zona C1 è caratterizzata da reservoir di media-buona qualità con spessori fino a 15m. I livelli sabbiosi sono generalmente continui anche se non distribuiti in maniera omogenea come quelli nella zona C2 sottostante
	C1b – Livelli sabbiosi nella parte inferiore della zona	
C2	C2a_1 – Livelli sabbiosi nella parte superiore della zona	La parte superiore della zona C2 è caratterizzata da reservoir di buona qualità con spessori fino a 20m. In alcuni pozzi sono stati identificati livelli specifici definiti come C2a_1/L e C2a_2/L.
	C2a_2 – Livelli sabbiosi nella parte superiore della zona	
	C2b – Livelli sabbiosi nella parte inferiore della zona	La parte inferiore della zona è caratterizzata da livelli fini con reservoir di media-buona qualità
C3	C3a – Livelli sabbiosi nella parte superiore della zona	La zona C3 è caratterizzata da sabbie di buona qualità. Solo alcuni pozzi hanno incontrato questa zona per cui l'interpretazione dei livelli sabbiosi della formazione è in generale incerta con l'esclusione del livello sabbioso più superficiale

Tabella 2. *Suddivisione in zone del giacimento e principali 'top' dei livelli sabbiosi*

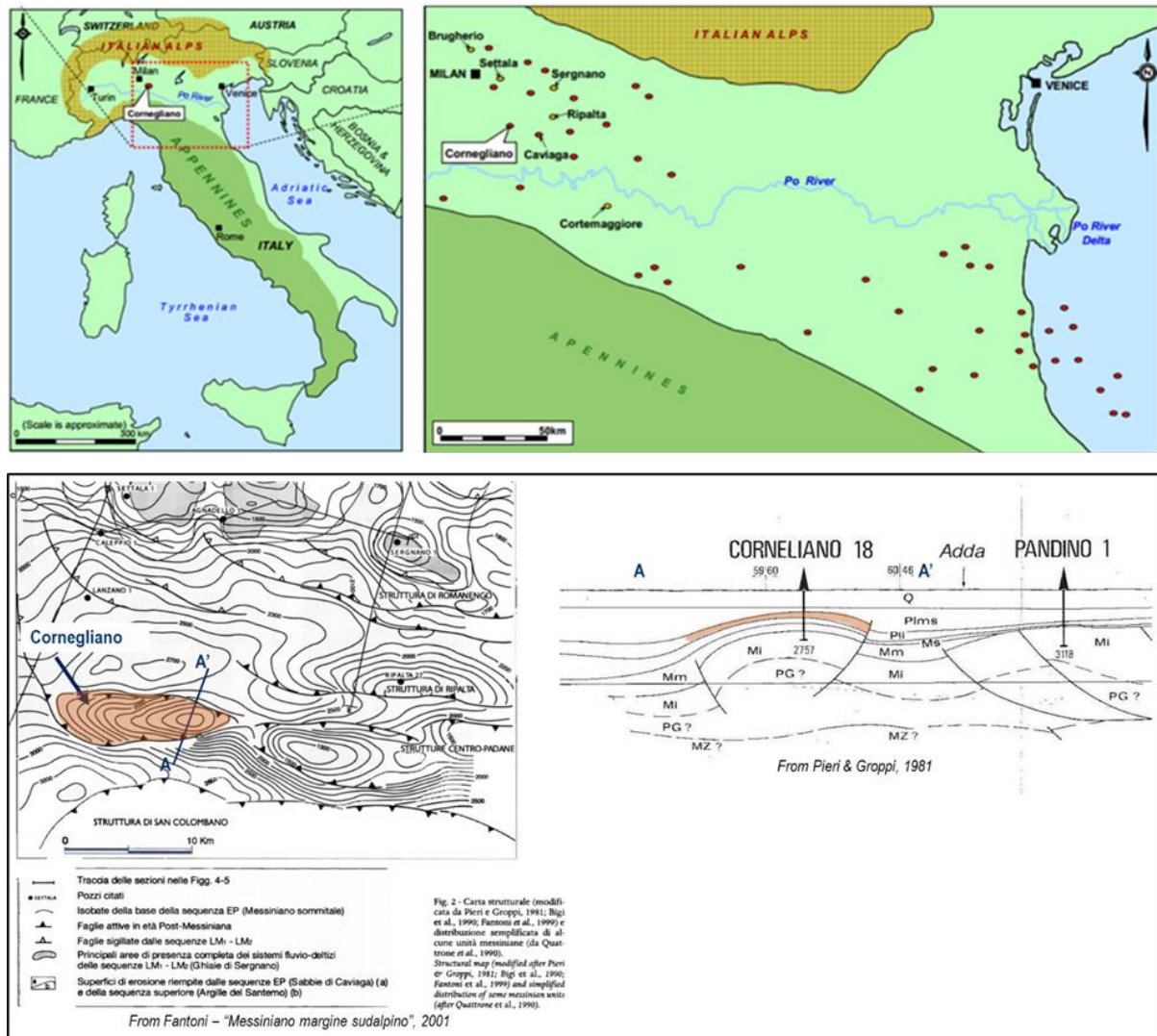


Figura 1. Il campo Cornegliano e l'ubicazione di altri campi nella zona (in alto). Mappa e sezione strutturale nella zona di interesse (in basso).

2.2 Modello tridimensionale di giacimento (statico e dinamico)

Prima di esporre l'analisi geomeccanica è importante riassumere i punti salienti della realizzazione dei modelli statico (geologico) e dinamico (simulazione numerica della storia produttiva del campo) e la successiva simulazione delle operazioni di stoccaggio (cicli di iniezione/produzione in un arco di tempo corrispondente a 25 anni), mettendo in luce quegli aspetti che hanno contribuito alla definizione del modello geomeccanico, che come già riportato ha lo scopo di caratterizzare le proprietà meccaniche del giacimento e della roccia di copertura, e di valutare le variazioni di sforzi-deformazioni durante le fasi di stoccaggio.

I modelli, statico e dinamico, integrano i dati raccolti dal precedente operatore durante lo sviluppo e la produzione del giacimento, con i risultati delle misure acquisite durante la perforazione ed il completamento, nonché i test dei pozzi perforati dai Cluster A e B. I dati acquisiti più rilevanti includono: wireline (misure strumentali successive alla perforazione) e while drilling logs (misure strumentali eseguite durante la perforazione), misure di laboratorio su carote e campioni di fluido, test di produzione, misure di pressione, ecc.; misure geofisiche di superficie (sismica 3D, VSP vertical seismic profiles e rilievo gravimetrico). Nella fase successiva i modelli hanno consentito di simulare la storia produttiva del campo (simulazione dinamica o history match) e delle operazioni di stoccaggio (forecast simulation analysis) descritte nel capitolo successivo.

2.2.1 Modello statico geologico

La realizzazione del modello statico include la definizione di un modello strutturale 3D seguito dalla distribuzione (property population) delle tipologie litologiche (nel seguito del rapporto indicate indifferentemente come lithotypes, facies o rock-types) e successivamente delle proprietà petrofisiche: porosità totale ed effettiva, permeabilità e saturazione a gas o acqua di formazione (**Figura 2**).

Il processo assicura che il modello strutturale rappresenti una completa integrazione dei seguenti risultati: l'interpretazione delle formazioni rilevanti eseguita sulla sismica 3D, la valutazione strutturale e deposizionale, l'analisi petrofisica e le informazioni di produzione. Le fasi fondamentali sono:

- Definizione del modello strutturale a seguito della conversione in profondità degli elementi interpretati sulla sismica 3D. Calibrazione delle superfici sismiche con i top delle formazioni geologiche relativi a ciascuna zona definita dai pozzi;
- Analisi delle caratteristiche (distribuzioni, correlazioni, ecc.) delle facies, delle proprietà petrofisiche e degli attributi sismici per definire la tecnica di modellizzazione più appropriata;
- Distribuzione nel modello strutturale 3D delle facies, porosità, permeabilità e saturazione (proprietà determinate in base all'analisi integrata di logs e misure di laboratorio effettuate sulle carote);

La stima del volume di gas iniziale (pre-produzione), e la definizione dello scenario base da usare per la simulazione dinamica concludono la definizione del modello statico.

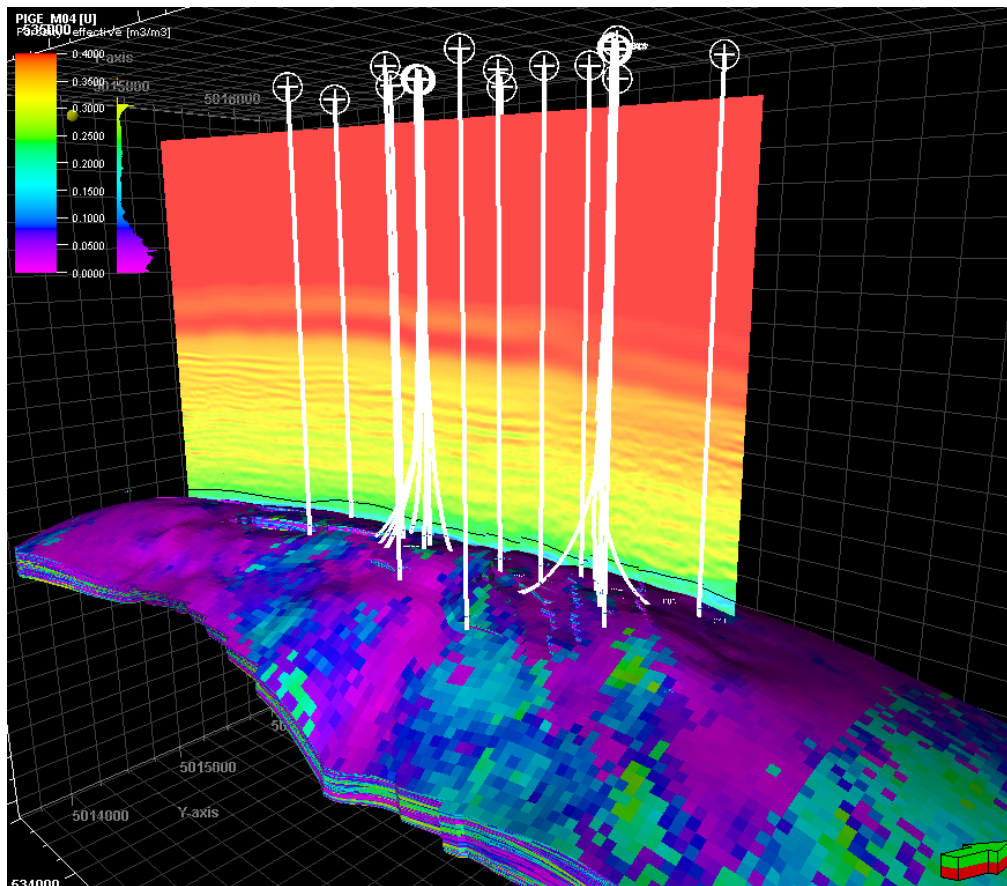


Figura 2. Il modello statico del giacimento

2.2.1.1 Definizione del modello strutturale

La prima fase della costruzione del modello statico consiste nell'individuare i principali elementi strutturali nel volume sismico 3D acquisito nel 2017 e successivamente processato e calibrato ai dati esistenti (log acustici nei pozzi A01 e B01). Gli elementi strutturali, superfici e barriere/discontinuità, definiti in base all'analisi della risposta sismica sono:

- Top "Sabbie di Asti", contrasto (riflettore sismico) corrispondente al top di una formazione caratterizzata da alta velocità (dedotta/calibrata sul log sonico)
- Top "Argille del Santerno", contrasto corrispondente al top di depositi argillosi che formano la copertura del giacimento
- Top "Livello C2" e base "Livello C3", contrasti nella formazione "Sabbie di Caviaga" caratterizzata da depositi torbidity (sequenza di livelli sabbiosi e argillosi) inizialmente (prima della produzione) mineralizzati a gas. I principali livelli distinti in base ai log acquisti sono: B, C1, C2 e C3.

L'obiettivo principale dell'interpretazione sismica è il Top del livello C2 che rappresenta un livello di sabbie di alta qualità nella formazione "Sabbie di Caviaga". Nella sismica è rappresentato da un valore di ampiezza positivo. Le variazioni laterali di ampiezza potrebbero essere associate a variazioni di porosità e/o presenza di gas residuo.

- Tre famiglie di discontinuità (barriere o faglie) sono state interpretate nel giacimento:
 - Faglie normali (da collasso crestale) lungo la direzione principale OSO-ENE

- Faglie normali in direzione N-S
- Faglie normali NO-SE

La qualità del segnale sismico degrada nella roccia di copertura, sopra le formazioni che corrispondono al giacimento, per cui l'estensione verticale delle faglie sopra descritte nonché ulteriori barriere/faglie superficiali sono state interpretate fin dove possibile.

Successivamente sono state individuate le zone che caratterizzano verticalmente le litologie presenti nel giacimento. Le zone non sono completamente decifrabili a scala sismica ma comunque definibili con il supporto dei top delle formazioni individuati nei log di pozzi che hanno risoluzione superiore alla sismica di superficie.

- Zone stratigrafiche principali B (B1 e B2) e C1, C2 e C3)
- Zone stratigrafiche secondarie C1a, C1b, C2a1, C2a2, C2b e C3a, definite in base all'interpretazione dei top delle formazioni sui pozzi storici e progressivamente (una volta disponibili i dati dopo ciascuna perforazione) sui pozzi perforati nei Cluster A e B.
- Zone di separazione (intra-layers) tra quelle principali e quelle secondarie intra-layers.

La suddivisione stratigrafica adottata è stata rivista durante le operazioni di perforazione, ed aggiornata in base alle acquisizioni di nuovi dati una volta disponibili.

Il modello strutturale 3D finale è caratterizzato da circa 2.2 milioni di celle, con estensione media laterale di 50x50 m e verticale di 1 m. Il modello statico riproduce fedelmente la struttura dell'anticlinale in direzione OSO-ENE, i top delle formazioni rilevanti e le famiglie di faglie/barriere interpretate nella sismica 3D. Gli elementi più significativi rilevati sulla sismica sono stati accuratamente caratterizzati: il ribassamento "graben" nella parte ovest del giacimento, la faglia principale, di forma irregolare, in direzione NO-SE, la famiglia di faglie in direzione NS nonché le faglie minori nella zone est del giacimento (**Figura 3**).

E' importante rimarcare che la struttura del modello statico è limitata al giacimento mentre il modello geomeccanico si estende sia verticalmente (dal piano campagna alle formazioni al disotto del giacimento) che lateralmente integrando nella definizione della struttura gli elementi derivati dall'analisi della risposta sismica 3D. Si rimanda alla **Sezione 2.5** per la modellizzazione geomeccanica 3D.

2.2.1.2 Analisi petrofisica

Una volta definita la struttura del giacimento, le proprietà petrofisiche sono distribuite (*property modelling*) nel modello tridimensionale. L'analisi che consente di definire le proprietà petrofisiche in base ai dati acquisiti durante le perforazioni (principalmente logs e carote) non è discussa in questo rapporto. La valutazione petrofisica può essere sintetizzata come segue:

- Caratterizzazione delle proprietà petrofisiche delle formazioni del giacimento (volumi litologici, porosità permeabilità e saturazione a gas o acqua di formazione) in base ai logs acquisiti durante la perforazione e calibrazione con le misure di porosità permeabilità effettuate in laboratorio sulle carote.
- Identificazione delle facies/rock-types e del sistema deposizionale in base alle caratteristiche dei logs e delle misure effettuate sulle carote (Routine Core Analysis, Special Core Analysis e studio petrografico). Le rock types, 3 quelle finali, corrispondono ad intervalli di valori, stabiliti in base a specifiche soglie, "cut-offs", di porosità, permeabilità e contenuto litologico caratteristici delle zone principali del giacimento.

La classificazione finale delle rock-types è descritta nella **Tabella 3**.

Rock types	Pore radius	Porosità (%)	Permeabilità (mD)
RT1 – Sabbie pulite Clean massive Sandstone	Macro porous > 5 microns	21 to 29	100 to 1700
RT2 – Sabbie argillose Shaly Sandstone	Meso porous 0.3 to 5 microns	17 to 23	0.8 to 100
RT3 – Marne argillose Siltstone Marlstone	NaN – No porous 0.01 to 0.3 microns	15 to 18	0.01 to 0.8

Tabella 3. *Classificazione delle facies/rock-types*

2.2.1.3 Distribuzione delle proprietà nel modello strutturale

La distribuzione geostatistica delle facies e delle proprietà petrofisiche (property population based on industry standard algorithms) nel modello strutturale 3D consente di ottenere volumi volti a rappresentare la natura del giacimento:

- **Rock-types.** Distribuite usando il noto algoritmo Sequential Indicator Simulation (SIS), preferibile in scenari dove forma ed estensione degli oggetti litologici è incerta e non accuratamente definita. Il risultato indica che le zone B1 and B2 hanno scarsa percentuale di livelli sabbiosi (RT1 e RT2) mentre sono dominate da livelli argillosi (RT3); C1 and C2 hanno percentuali di sabbia nell'ordine del 65% (RT1 e RT2) così come la zona C3. La zona C3 è inclusa nel modello statico nonostante contribuisca marginalmente alla produzione storica in quanto per lo più saturata ad acqua; è comunque importante perché influenza la dinamica del giacimento connettendo l'acquifero alle formazioni interessate allo stoccaggio.
- **Porosità (totale ed effettiva).** Ottenuta con distribuzione 'condizionata' alle rock-types usando i logs dei pozzi come input principale. Una sezione del modello di porosità è mostrata nella figura
- **Permeabilità.** Derivata dalla porosità in base a regressioni (per rock-type) calcolate in base alle misure di carota (Routine Core Analysis and SCAL)
- **Saturazione a gas** derivata usando un predefinito Saturation Height Model (SHM), modello che definisce l'altezza della colonna di gas in funzione di permeabilità e pressione capillare (misurata in laboratorio sulle carote).

Il modello statico descritto sopra permette di definire il gas inizialmente in posto prima della produzione (GIIP), stimato nell'ordine di 3000 Msm³ (3 miliardi di metri cubi di gas); la stima è in linea con quelle derivate in precedenti studi.

Dalla **Figura 3** alla **Figura 5** sono mostrate la mappa finale del top della zona C2 e alcune sezioni, una longitudinale ed una trasversale del giacimento.

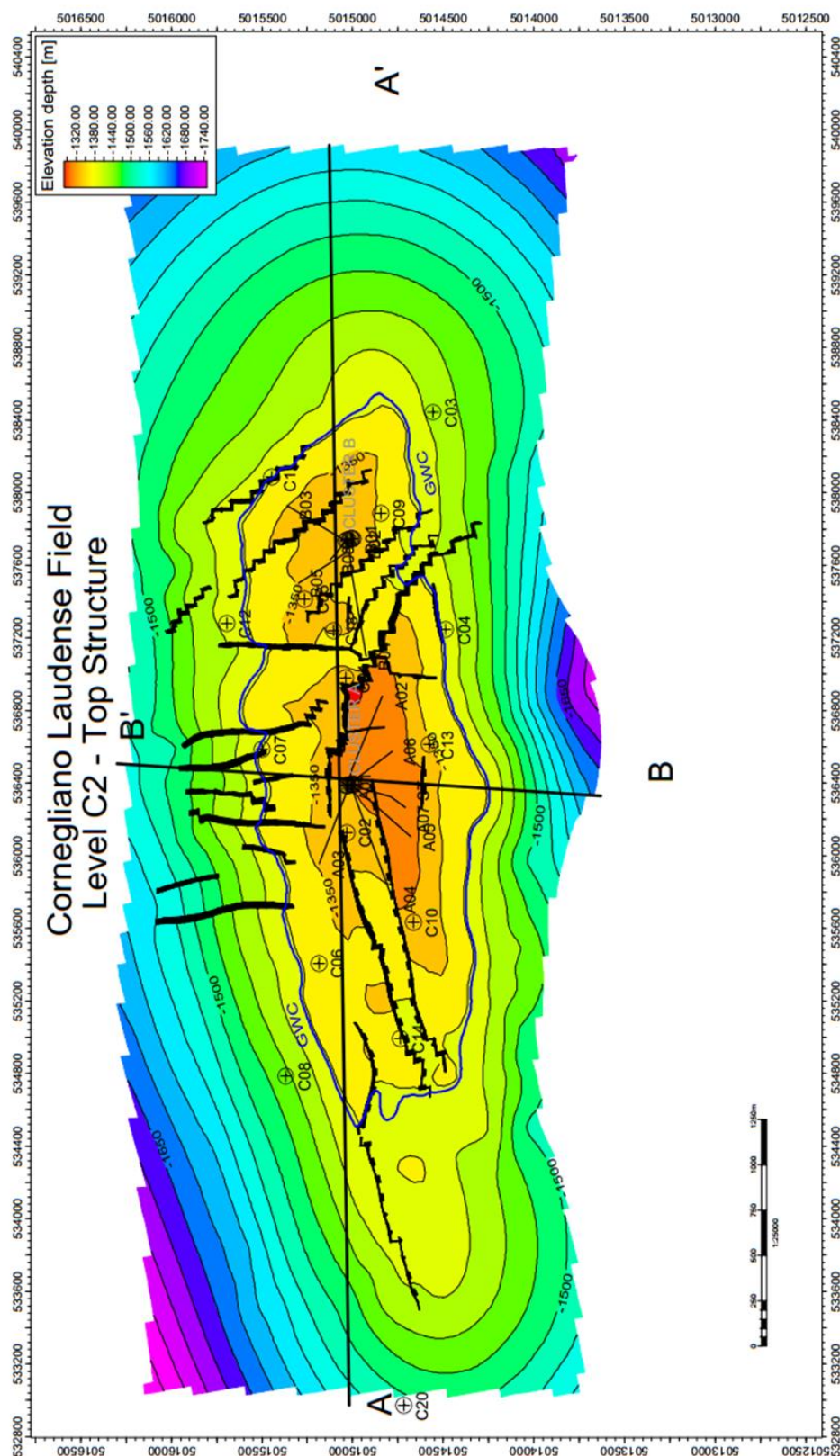


Figura 3. Top della zona C2

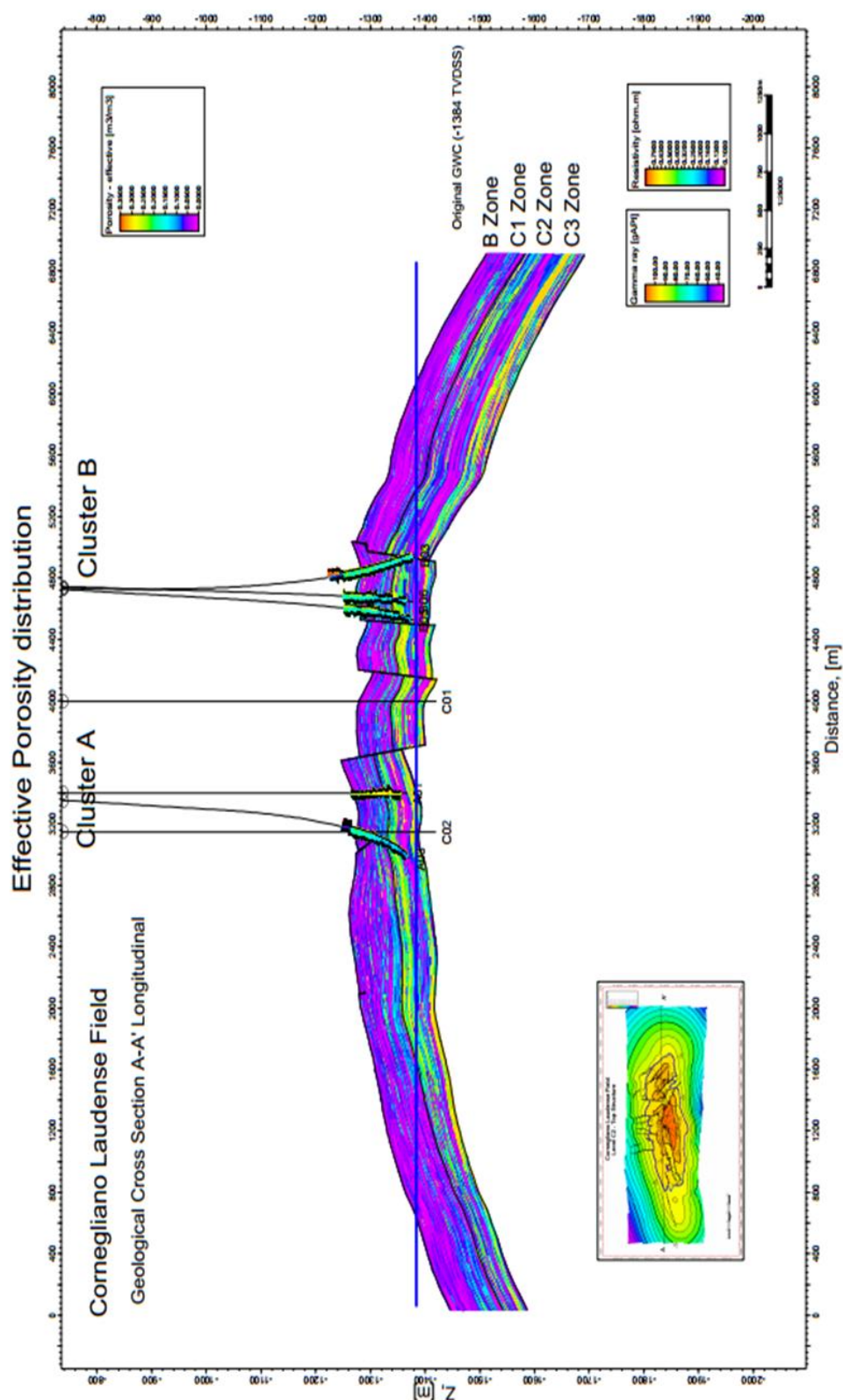


Figura 4. Sezione longitudinale estratta dal modello 3D di porosità

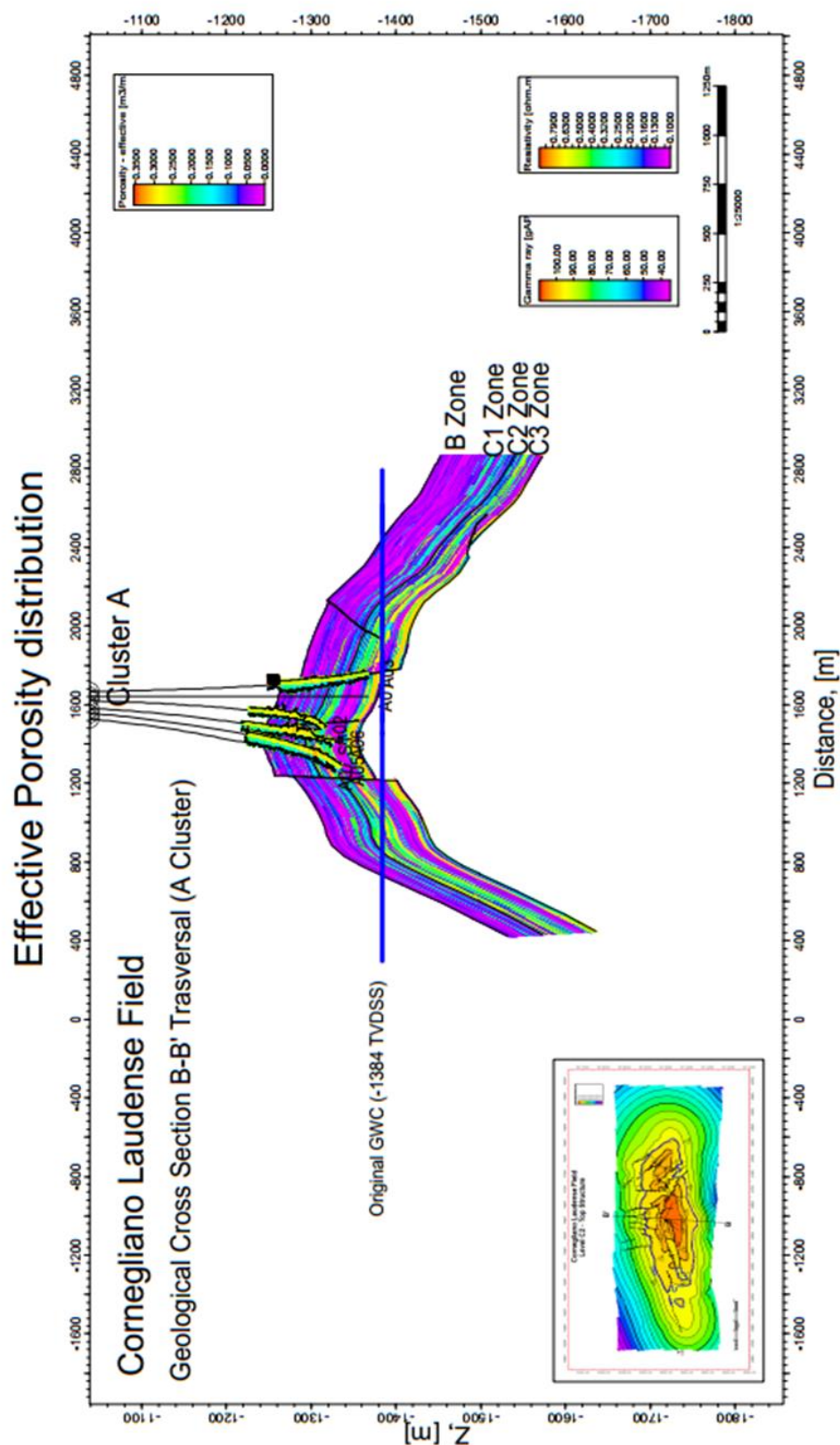


Figura 5. Sezione trasversale estratta dal modello 3D di porosità

2.2.2 Modello dinamico

Il modello statico è il punto di partenza per definire il modello dinamico che simula la storia produttiva del giacimento (history match process). La simulazione del giacimento è stata inizializzata includendo in input i risultati delle fasi precedenti: proprietà petrofisiche (porosità e permeabilità) preservandone la risoluzione vertical e laterale, la saturazione in fluido (due fasi: gas e acqua di formazione) legata alla pressione capillare, la profondità del contatto gas acqua iniziale ed i dati relativi alle proprietà del fluido (pressione e PVT); le curve di permeabilità relativa e di pressione capillare definite in base all'analisi dei dati e classificate per rock-type; gli schemi di completamento dei pozzi e relativi 'work-over'.

Il modello è stato successivamente diviso in 5 compartimenti definiti in base alle faglie/discontinuità definite in precedenza, tenendo conto delle misurazioni di pressione e variazioni nel contatto gas residuo acqua rilevate ai pozzi nei Cluster A e B e rispettando le variazioni osservate nei declini di pressioni misurate ai pozzi storici durante la produzione del giacimento. Tutte le regioni sono idraulicamente separate, eccetto le due regioni parzialmente connesse a sud del Cluster A. L'evoluzione della pressione durante la produzione e la successiva ripressurizzazione dopo la produzione è controllata dall'acquifero (modello di tipo Fetkovich) definito su tre lati (ovest, sud e est) del modello di giacimento.

Un'accurata analisi di sensitività ha consentito di identificare i parametri che influenzano maggiormente la simulazione: dimensione e indice di produttività dell'acquifero (size e productivity index), connettività tra i compartimenti, moltiplicatore associato al volume poroso in ciascun compartimento, forma delle curve di permeabilità relativa. E quindi di stabilire la prescelta calibrazione per il giacimento minimizzando la differenza tra pressione modellata e misurata.

La fase finale del processo di simulazione consiste nel raffinare la calibrazione a ciascun pozzo, rivedendo localmente la distribuzione delle rock-types, introducendo coefficienti di trasmissibilità per controllare la produzione storica di acqua, ecc., volta ad ottenere un buon history match tra produzione effettiva e simulata a ciascun pozzo storico, minimizzando le differenze con i vari contatti gas acqua osservati ai pozzi perforati nei Cluster A e B nonché la ripressurizzazione occorsa nei 30 anni successivi alla produzione.

2.2.3 Simulazione delle operazioni di stoccaggio

Il modello dinamico dopo l'history match ha consentito di eseguire una serie di simulazioni delle operazioni di stoccaggio (forecast scenarios) in base a condizioni operazionali e requisiti tecnici indicati da Ital Gas Storage.

Le simulazioni sono state inizializzate tenendo conto di una serie di definizioni in linea con i requisiti specificati dal Regolatore. L'obiettivo delle simulazioni è quello di identificare la strategia ottimale per la gestione del campo rispettando i requisiti imposti. Le principali definizioni sono:

- **Working Gas (WG).** Per ogni ciclo corrisponde al volume massimo di gas che può essere prodotto durante la fase di produzione (che corrisponde a mezzo ciclo).
- **Cushion Gas (CG).** Per ogni ciclo corrisponde al volume di gas stoccato calcolato a fine ciclo al netto del gas prodotto. Il CG non include il gas residuo presente nel giacimento all'inizio delle operazioni di stoccaggio.
- **Plateau Rate (PR).** Per ogni ciclo corrisponde alla massima portata di gas prodotto che può essere sostenuta per un periodo di 15 giorni durante la fase di produzione.
- **Efficiency Factor.** L'efficienza per ogni ciclo corrisponde al rapporto $WG/(WG+CG)$ e deve essere superiore al 50%.

- **Duration.** La durata per ogni ciclo corrisponde al tempo necessario per produrre l'80% del WG calcolato a partire dall'inizio della fase di produzione.
- **Maximum Technical Peak Rate.** Il valore massimo di picco per ciascun ciclo corrisponde alla portata massima che può essere sostenuta per 24 ore all'inizio della fase di produzione.

Le sezioni esposte al giacimento (dreni) dei pozzi perforati nel Cluster A e B nel periodo 2016-2017, sono usati come iniettori/produttori durante le simulazioni. Due dreni addizionali, ancora da completare, sono stati inclusi a partire dal quarto anno dopo l'inizio delle operazioni di stoccaggio.

Tutti i pozzi sono vincolati a rispettare le stesse condizioni operazionali in termini di portata min/max e pressione min/max di fondo e testa pozzo per le varie simulazioni, che sono definite per investigare la variabilità del Maximum Technical Peak Rate e del Massimo Plateau Rate per una Duration di 70 giorni. La fase iniziale "ramp up" è fissata in 3 anni per cui Plateau Rate e Duration sono monitorati a partire dal quarto anno.

Con riferimento al modello geomeccanico, lo scenario di iniezione/produzione considerato per la modellamento degli sforzi durante le operazioni di stoccaggio prevede 2 cicli all'anno: 52 regimi di pressione fino al 2043. L'analisi considera uno schema di tipo one-way coupling tra il simulatore geomeccanico e quello del giacimento descritta nelle sezione precedenti. La **Tabella 4** mostra i parametri specifici corrispondenti al caso di simulazione del giacimento.

Nome di riferimento della simulazione ExA4SB_WG77_AS2_PLFN3E	
Pozzi attivi	Primi 3 anni: 10 pozzi Dopo 4 anni: 12 pozzi (due pozzi aggiuntivi, B02 e B07)
Cicli di produzione	Plateau mantenuto per 15 giorni. Working Gas (80%) Durata 77 giorni Capacità di trattamento dell'acqua del campo 200 m3/g Portata max. di gas dei pozzi 6 M sm3/g Min. BHP 50 Barsa (A01:70 Barsa) Pozzi a rapporto acqua-gas elevato chiusi o a erogazione ridotta
Cicli di iniezione	Portata max. di gas dei pozzi 2 M sm3/g Max. BHP 169 Barsa (A01:182 Barsa) Max. THP 180 Barsa

Tabella 4. *Caso di pressione di ingresso del simulatore Eclipse*

2.3 Introduzione al modello geomeccanico

Le sezioni che seguono descrivono l'approccio usato nell'analisi geomeccanica dettagliando i passi intrapresi per condurre uno studio a supporto della caratterizzazione del sito e delle operazioni di stoccaggio (UGS). Gli obiettivi del presente studio sono:

1. Modello geomeccanico 1D (lungo il pozzo) allo stato attuale per due pozzi realizzati nel campo Cornegliano (pozzi A01 e B01).
2. Integrazione dei risultati di prove di laboratorio per la calibrazione delle proprietà meccaniche.
3. Modello geomeccanico 3D del giacimento (condizioni iniziali di tensione) definito sulla base del modello statico geologico.
4. Analisi della stabilità delle perforazioni e ottimizzazione della traiettoria dei pozzi pianificati per il campo utilizzando i risultati forniti dal modello 3D.
5. Integrazione delle variazioni di pressione stimate dal modello dinamico 3D del giacimento per calcolare le variazioni di sforzi-deformazioni durante le operazioni di stoccaggio (fasi di iniezione/produzione con la simulazione delle attività di stoccaggio e quindi del flusso delle diverse fasi nei mezzi porosi).
6. Analisi delle condizioni necessarie per assicurare l'integrità del giacimento relativamente a:
 - a. Deformazione del giacimento, causa di sollevamento e subsidenza in superficie.
 - b. Analisi dell'integrità della roccia di copertura (cap rock).
 - c. Analisi della stabilità delle faglie.

Il flusso di lavoro applicato per la valutazione geomeccanica, riepilogato in **Figura 6**, è costituito da 4 fasi:

- i. Screening dei dati: durante questa fase sono raccolte le informazioni disponibili.
- ii. Integrazione dei dati: ovvero la definizione di un modello strutturale statico che includa informazioni ottenute da attributi geologici e dai profili dei singoli pozzi (parametri meccanici, pressioni e sforzi).
- iii. Analisi: durante questa fase gli sforzi attuali e la loro evoluzione nel tempo per effetto delle variazioni di pressione determinate dal modello del giacimento sono calcolati imponendo carichi tettonici e pressioni interstiziali.
- iv. Applicazione: durante questa fase, i risultati derivati dai cubi degli sforzi e delle proprietà sono utilizzati per applicazioni di ingegneria dei pozzi, alla produzione, all'integrità del campo (per esempio all'analisi della compattazione, della subsidenza, dell'integrità della roccia di copertura, della riattivazione delle faglie).

Sulla base di questo flusso di lavoro, le proprietà meccaniche e gli sforzi sono stati derivati da log wireline a scala di pozzo e calibrati con riferimento alle misurazioni disponibili (test sulle carote, risultati, prove di formazione, analisi della deformazione delle perforazioni dei pozzi – immagini/caliper, rapporti di perforazione, scavamenti) eseguendo un'analisi di stabilità delle singole perforazioni (WBS). La **Figura 7** illustra il flusso di lavoro della geomeccanica dei singoli pozzi. Come indicato, i risultati possono essere utilizzati sia per applicazioni relative ai singoli pozzi sia per il modellamento 3D. In quest'ultimo caso, nel passaggio evidenziato dal rettangolo tratteggiato del flusso di lavoro generale (**Figura 6**), sono utilizzati i risultati ottenuti dal modellamento 1D.

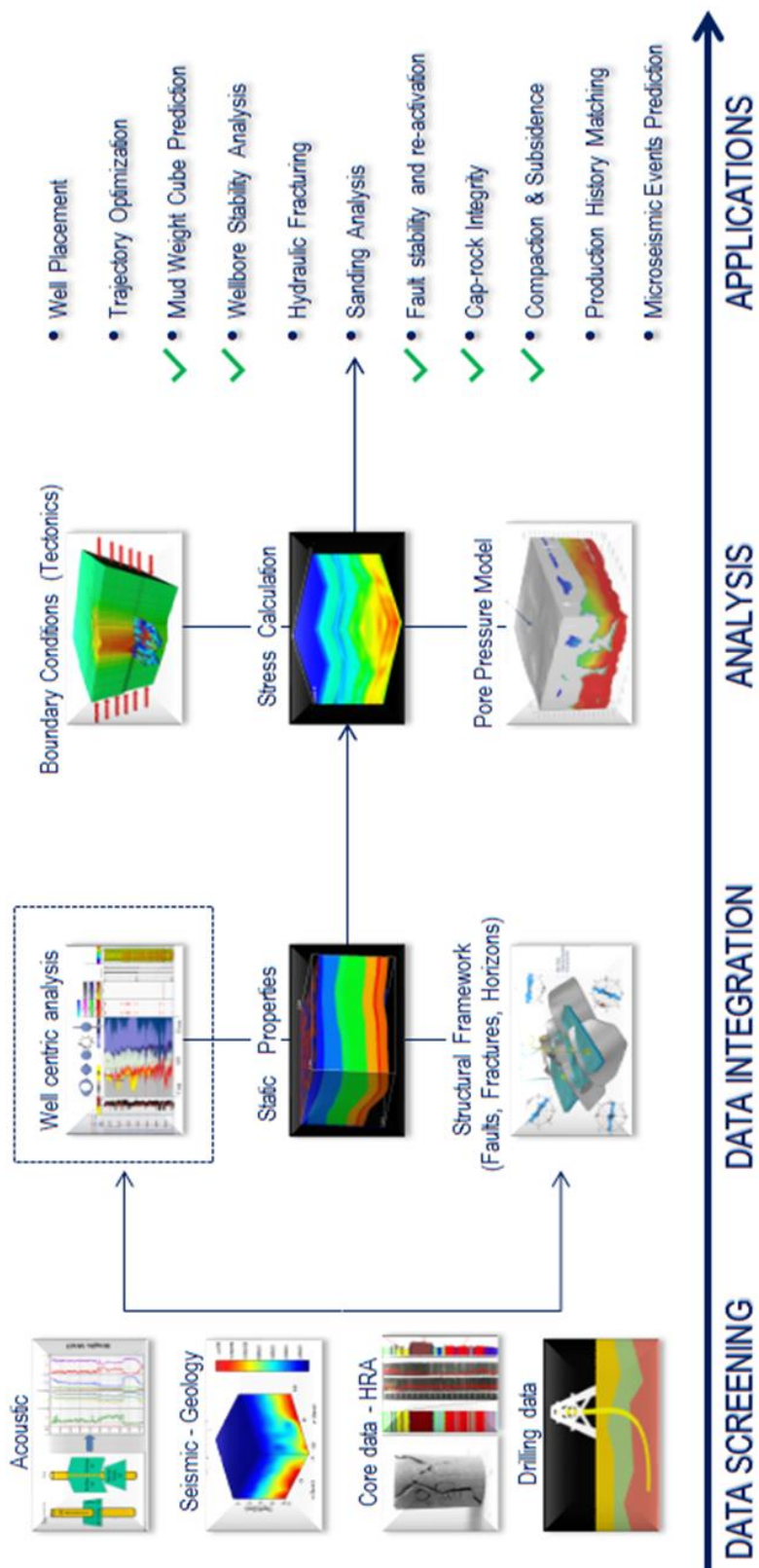


Figura 6. Il flusso di lavoro geomeccanico integrato

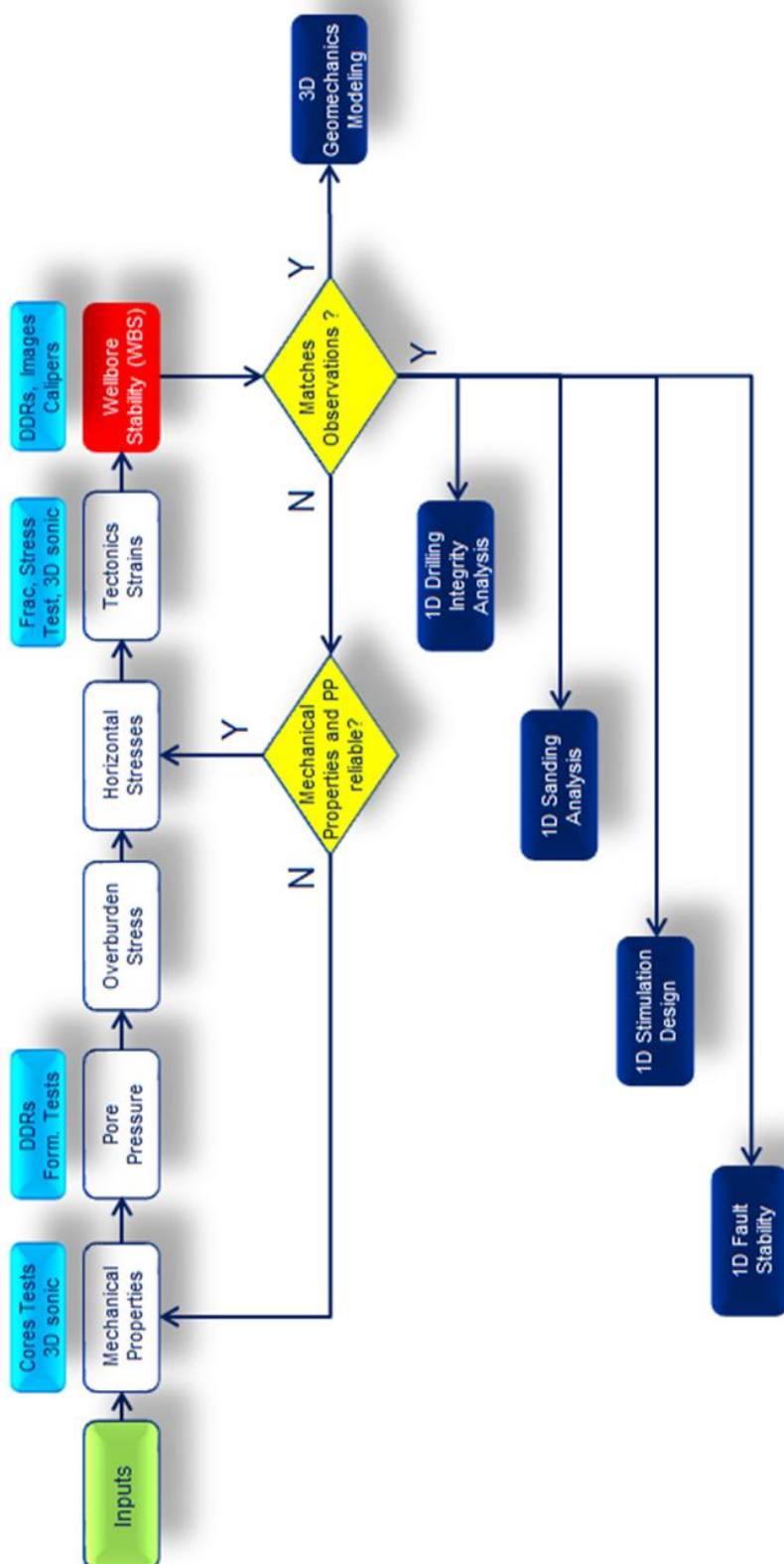


Figura 7. Il flusso di lavoro del modello meccanico lungo i pozzi

2.4 Analisi dei singoli pozzi: obiettivi, metodologia

Gli obiettivi principali dell'analisi dei singoli pozzi sono:

1. Integrare e analizzare i log disponibili e altri dati raccolti sul campo.
2. Realizzare modelli geomeccanici (Mechanical Earth Model - MEM) 1D per i pozzi A01 e B01 (MEM post-perforazione).
3. Rifinire e calibrare il modello MEM utilizzando i risultati dei test sulle carote esistenti [1] e misurazioni degli sforzi locali.
4. Rifinire e calibrare l'analisi della stabilità delle perforazioni dei pozzi (Wellbore Stability - WBS) utilizzando caliper, dati di perforazione e immagini delle perforazioni (se disponibili) e determinare il peso (densità) dei fluidi (fanghi) di perforazione (Mud Weight Window - MWW) corrispondente.

Schlumberger ha approcciato lo studio in fasi:

- Fase 1. Audit dei dati.
- Fase 2. Creazione di un modello geomeccanico (MEM) ed esecuzione di un'analisi WBS della perforazione esistente.

2.4.1 Audit dei dati

Lo scopo dell'audit dei dati è fornire una panoramica di tutti i dati pertinenti allo studio geomeccanico in termini di disponibilità, qualità e copertura delle perforazioni dei pozzi. Tipicamente, i dati pertinenti includono dati di studi, dati di perforazione, dati di log, dati di prove di laboratorio e in loco e informazioni geologiche come top dei pozzi. Una serie minima di log che consenta un modellamento geomeccanico soddisfacente richiede:

1. Misurazioni soniche (onde P ed S e/o soniche 3D per l'anisotropia intrinseca e indotta dagli sforzi).
2. Log di densità.
3. Dati relativi a campioni (carote).
4. Test su formazioni e/o rapporti di fratturazione idraulica.
5. Log di immagini e/o caliper.

Per A01 e B01, sono disponibili gli input principali necessari ad avviare il flusso di lavoro illustrato in **Figura 7** (GR, densità, velocità di compressione e di taglio).

Sono inoltre disponibili i risultati di prove di laboratorio per campioni (carote) prelevati all'interno della formazione Argille del Santerno (roccia di copertura) e del giacimento negli intervalli 1207,31 m – 1436,30 m (pozzo A01) e 1212,47 m – 1435,40 m (pozzo B01) [1]. Ove assenti le informazioni fornite da prove di laboratorio, sono stati presi in considerazione valori di riferimento delle proprietà meccaniche ottenuti dalla letteratura o da database di proprietà.

Per la calibrazione dello sforzo orizzontale minimo [2], è stata utilizzata una prova 'Microfrac Test (prova MDT) per il pozzo B01 a 1327 m (profondità dei packer medi). Il valore stimato dello sforzo orizzontale minimo (Shmin) è 2990 psi (206,15 bar). Sono anche disponibili numerose misurazioni della pressione interstiziale nel giacimento e nella copertura.

I caliper log sono stati utilizzati per confrontare la rottura prevista e osservata delle perforazioni dei pozzi al fine di ottenere la migliore stima possibile degli sforzi sotterranei.

2.4.2 Modelli geomeccanici (MEM) 1D e analisi della stabilità dei pozzi.

Sulla base del flusso di lavoro mostrato in **Figura 7** le proprietà meccaniche e gli sforzi sono stati ottenuti dai dati di log wireline calibrati rispetto alle misurazioni disponibili (test sulle carote, prove di formazione, analisi della deformazione delle perforazioni dei pozzi – immagini/caliper, rapporti di perforazione, scavernamenti) eseguendo un'analisi WBS.

Il flusso di lavoro inizia con l'audit dei dati e la definizione dei dati di input del modello (riquadro verde). La fase aggiuntiva di controllo della calibrazione (riquadri blu) consente di vincolare le proprietà meccaniche previste, la pressione interstiziale e gli sforzi, alle misurazioni disponibili (in loco e fornite da prove di laboratorio). Come menzionato, i dati di calibrazione sono essenziali per l'affidabilità del modello MEM. Principalmente, questi dati sono: (i) misurazioni in loco degli sforzi delle pressioni di chiusura (per esempio ELOT, MDT, DataFrac/Minifrac) e (ii) prove di laboratorio su campioni (carote). Il processo di valutazione geomeccanica è eseguito per mezzo dell'analisi WBS (riquadro rosso).

Una volta calibrato il modello i risultati possono essere utilizzati per il modellamento pre-perforazione di pozzi o, come nel caso del presente studio, per supportare la realizzazione e la calibrazione di un modello 3D del giacimento.

2.4.2.1 Proprietà meccaniche (elastiche e resistenza)

Le proprietà meccaniche delle rocce includono le proprietà poroelastiche (modulo di Young E, rapporto di Poisson PR), il coefficiente poroelastico di Biot (ALFA) e le proprietà di resistenza (resistenza alla compressione semplice UCS), l'angolo di attrito interno (FANG) e la resistenza a trazione (TSTR). Sono stati utilizzati dati di log (nello specifico, la velocità di compressione e di taglio e la densità apparente delle rocce) per calcolare i moduli elastici dinamici (G_{dyn} , K_{dyn}) da cui derivano il modulo di Young (E) e il rapporto di Poisson (ν).

La **Figura 8** illustra il processo di calcolo delle proprietà. Le proprietà isotrope dinamiche sono calcolate come segue:

$$G_{dyn} = (13474.45) \times \frac{\rho_b}{(\Delta t_{shear})^2} \quad (1)$$

$$K_{dyn} = (13474.45) \rho_b \left[\frac{1}{(\Delta t_{comp})^2} \right] - \frac{4}{3} G_{dyn} \quad (2)$$

$$E_{dyn} = \frac{9G_{dyn} \times K_{dyn}}{G_{dyn} + 3K_{dyn}} \quad (3)$$

$$\nu_{dyn} = \frac{3K_{dyn} - 2G_{dyn}}{6K_{dyn} + 2G_{dyn}} \quad (4)$$

dove Δt_{comp} e Δt_{shear} sono espressi in $\mu s/ft$ (slowness) e la densità apparente delle rocce (ρ_b) in g/cm^3 .

Le proprietà elastiche, calcolate dai log, sono denominate "dinamiche" in quanto le misurazioni soniche sono effettuate ad alta frequenza. Poiché la deformazione o la rottura sono processi relativamente lenti rispetto alla propagazione di onde ad alta frequenza, come riferimenti geomeccanici si sono utilizzati set di dati statici forniti da test di laboratorio sulle carote. Pertanto, i log delle proprietà elastodinamiche sono generalmente calibrati con riferimento a misure statiche a punto singolo di campioni (carote).

Sono disponibili numerose correlazioni di pubblico dominio e proprietarie per calcolare i moduli elastici statici da valori dinamici quando la mancanza di dati di laboratorio non consente una calibrazione diretta. Per il presente studio, ai fini del calcolo del modulo di Young statico dal modulo di Young dinamico, si è dimostrata soddisfacente una correlazione proprietaria (definita a partire da misure su campioni acquisiti nel North Sea).

Il rapporto di Poisson statico è stato derivato dalla sua controparte dinamica.

Il coefficiente elastico di Biot α è una proprietà delle rocce che descrive quanto sia comprimibile la struttura solida (della roccia) a secco rispetto alla matrice rocciosa per effetto delle variazioni della pressione interstiziale applicata. Questo parametro varia da un valore prossimo allo zero per rocce a zero porosità molto rigide (basalti e nuclei di pirite) a un valore prossimo all'unità per rocce molto porose in bacini sedimentari poco profondi.

$$\alpha = 1 - \frac{K_{skeleton}}{K_{solid}} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2} \quad (6)$$

Per il presente studio, il coefficiente di Biot è stato stimato utilizzando la relazione (5), dove $K_{skeleton}$ è stato ottenuto dalle proprietà elastiche statiche stimate. I valori di $K_{skeleton}$ sono stati ottenuti dalla letteratura per le principali frazioni granulometriche.

UCS è il carico per unità di area al quale un campione cilindrico cede in compressione senza alcuna pressione confinante applicata (cella). È stato utilizzato un metodo proprietario di Schlumberger (correlazione del modulo di Young statico) per calcolare il profilo di UCS nelle rocce grano-sostenute e la correlazione di Horsrud (eq. (7)) per le rocce argilla-sostenute (vedere anche il riferimento [1]).

$$UCS = 0.77 \left(\frac{304.8}{\Delta t_{shear}} \right)^{2.93} [\text{MPa}] \quad (7)$$

Per identificare le rocce grano-sostenute e argilla-sostenute, è stato utilizzato il log GR ipotizzando una soglia a 75 GAPI. Pertanto, $GR < 75$ GAPI identifica la classe delle rocce grano-sostenute, mentre $GR > 75$ GAPI corrisponde alla classe delle rocce argilla-sostenute. Il profilo finale di UCS è un profilo composito risultante dalle due correlazioni e controllato dalle classi GR.

La resistenza a trazione TSTR (che corrisponde alla capacità della roccia di resistere a carichi di trazione) è stata ipotizzata pari al 10% di UCS, un rapporto comunemente osservato nei risultati sperimentali e adottato come riferimento in assenza di misurazioni dirette della resistenza a trazione delle rocce.

L'angolo di attrito interno (FANG) identifica l'attrito che si sviluppa lungo i contatti tra i costituenti solidi. Per il presente studio, l'angolo di attrito è stato stimato sulla base di una correlazione con il GR per distinguere tra i costituenti solidi grano-sostenuti e argilla-sostenuti.

Per verificare la validità delle proprietà meccaniche stimate utilizzando lo schema di cui alla **Figura 7** e consentire la calibrazione dei profili, i valori delle proprietà meccaniche ottenuti da prove di laboratorio

[1] sono stati rappresentati in funzione delle proprietà derivate da log per i pozzi A01 e B01 (**Figura 9 e Figura 10**).

Le proprietà derivate dai log appaiono, in generale, ben calibrate rispetto alle misurazioni di laboratorio. Come osservabile, la correlazione tra i dati di laboratorio e i profili stimati è meno accurata per il Poisson's Ratio e mostra una dispersione più elevata. Questo fatto è spesso rilevato in caso di calibrazione del Poisson's Ratio e può essere dovuto a vari fattori, tra i quali i più significativi sono: (a) la precisione delle misurazioni di laboratorio, (b) la pertinenza della correlazione tra rapporto statico e rapporto dinamico. Riguardo al punto (a), in generale si riconosce che, a causa del piccolo intervallo di deformazione delle misurazioni necessario a ottenere il Poisson's Ratio (deformazioni assiale radiale da $1 \cdot 10^{-5}$ a $1 \cdot 10^{-6}$), le misurazioni di laboratorio sono spesso al limite della precisione dei dispositivi disponibili. Per quanto riguarda il punto (b), come indicato in **Figura 8**, il Poisson's Ratio è ottenuto da misurazioni acustiche ad alta frequenza che non prevedono variazioni della porosità (condizioni non drenate). Questa misura è controllata dai contatti tra i grani. La misurazione del Poisson's Ratio statico è derivata dalla parte lineare della curva rappresentante le deformazioni radiali in funzione delle deformazioni assiali. Le variazioni della porosità, la distribuzione dei pori e la connettività dei pori controllano questa misura. La misurazione più affidabile deve essere eseguita su un ciclo di carico-scarico. La combinazione di (a) e (b) causa l'elevata dispersione tra le misurazioni statiche e dinamiche e, talvolta, rende difficile identificare correlazioni significative. Nel presente studio, il Poisson's Ratio statico è stato derivato dalla sua controparte dinamica applicando un valore di offset che ha consentito di ottenere una corrispondenza ragionevole con i risultati delle prove di laboratorio.

La stima della UCS a partire dai log non ha richiesto una calibrazione specifica. Il profilo derivato dai log corrisponde in maniera abbastanza precisa al valore di riferimento nella roccia di copertura. Un'ulteriore calibrazione della UCS è stata effettuata, dopo l'analisi della stabilità delle perforazioni, in sezioni di argille per consentire di riprodurre le deformazioni suggerite dall'interpretazione dei caliper.

In mancanza di prove di laboratorio specifiche che ne consentissero la calibrazione, il parametro TSTR è stato assunto pari al 10% della UCS finale.

I risultati della FANG da prove di laboratorio mostrano una buona corrispondenza con il log previsto basato sulla correlazione GR e non sono state necessarie ulteriori calibrazioni.

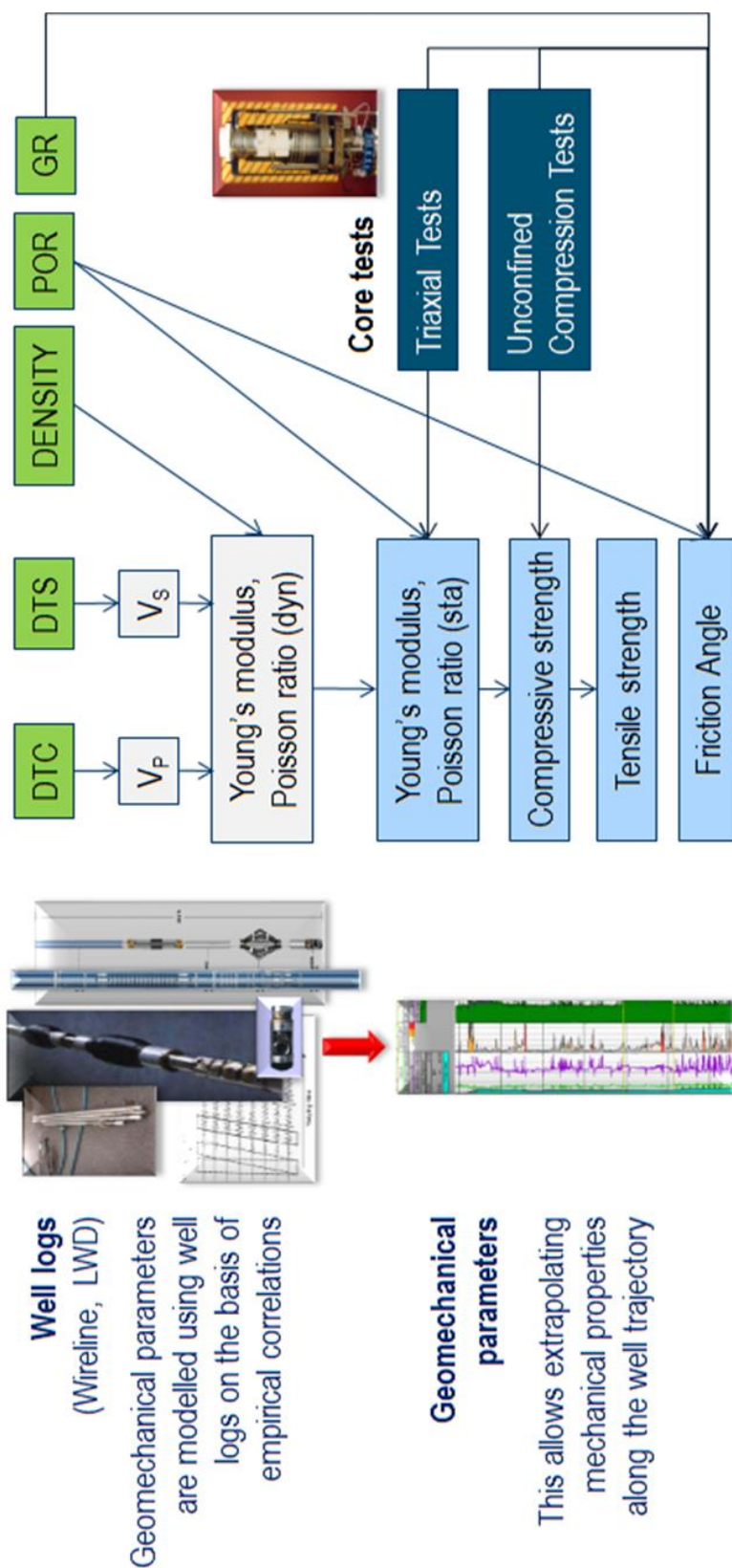


Figura 8. Processo di modellamento delle proprietà per definire i parametri elastici e di resistenza log wireline.

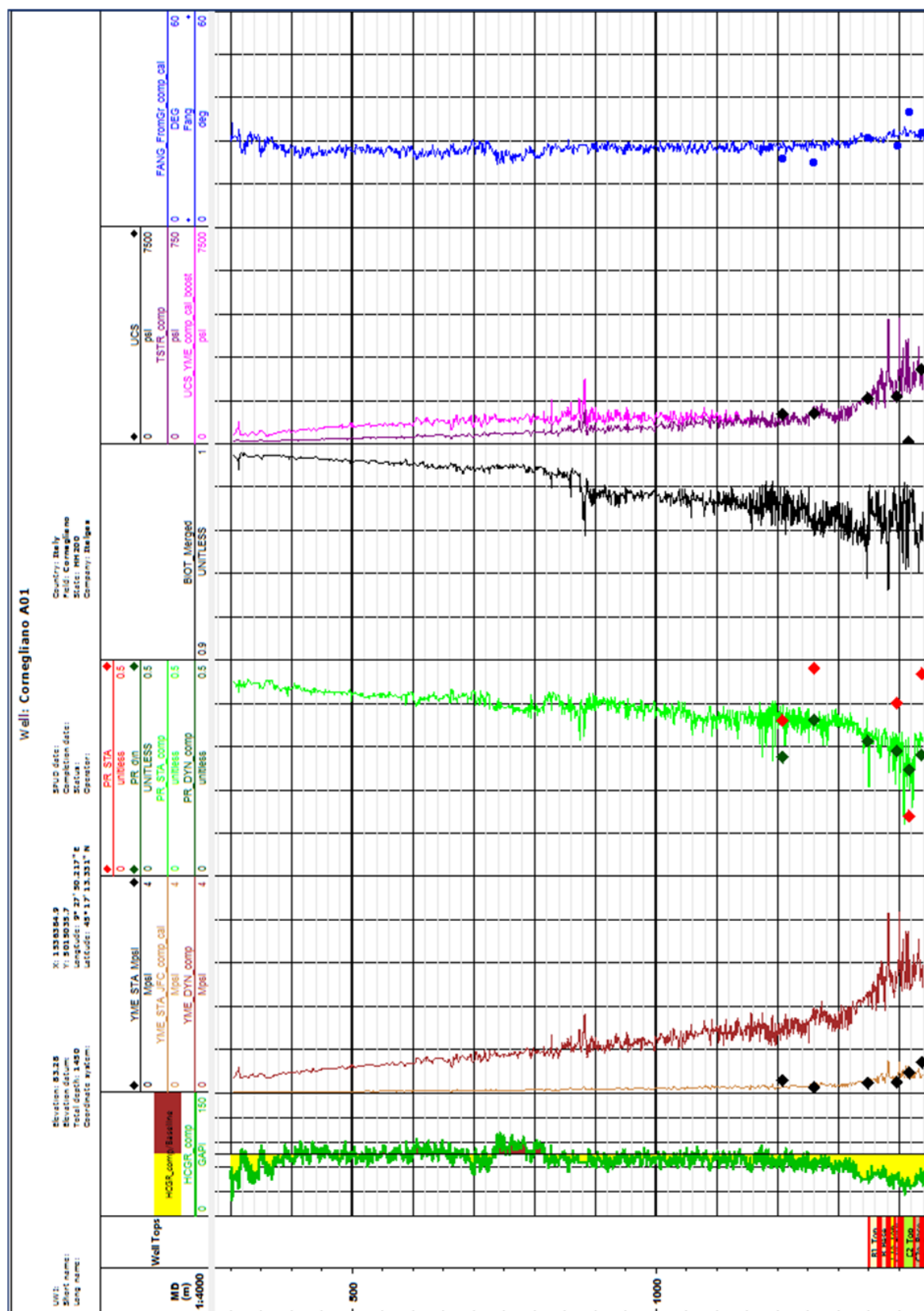


Figura 9. Modellamento delle proprietà del pozzo A01: Traccia 3 = GR, Traccia 4 = modulo di Young' (dinamico e statico), Traccia 5 = rapporto di Poisson, Traccia 6 = coefficiente di Biot', Traccia 7 = UCS (profilo magenta) e TSTR (resistenza a trazione, profilo blu scuro). I punti sono relativi ai risultati delle prove di laboratorio utilizzati per la calibrazione.

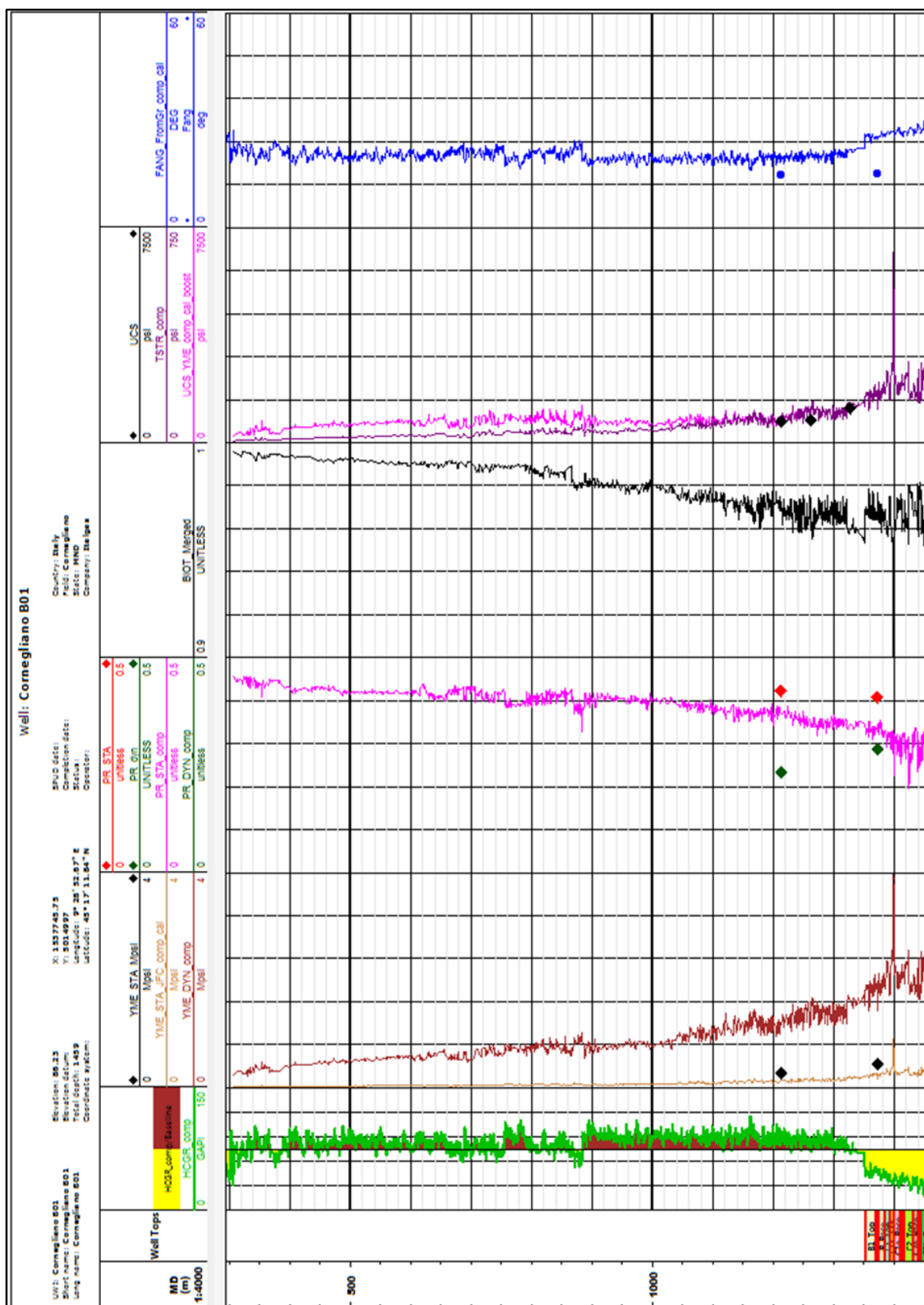


Figura 10. Modellamento delle proprietà del pozzo B01: Traccia 3 = GR, Traccia 4 = modulo di Young' (dinamico e statico), Traccia 5 = rapporto di Poisson, Traccia 6 = coefficiente di Biot', Traccia 7 = UCS (profilo magenta) e TSTR (resistenza a trazione, profilo blu scuro). I punti sono relativi ai risultati delle prove di laboratorio utilizzati per la calibrazione.

2.4.2.2 Pressione interstiziale

All'interrarsi del sedimento, l'aumento di peso dell'overburden compatta il sedimento causando la riduzione del volume e la fuoriuscita di fluidi che occupano gli spazi (vuoti) che caratterizzano la porosità totale connessa. Questo processo determina una diminuzione della porosità che varia con la profondità. L'acqua defluisce se la permeabilità del sedimento non è troppo bassa e se il tasso di interrimento e il carico non sono troppo elevati. Se l'acqua defluisce liberamente mantenendo una pressione idrostatica, si ritiene che il sedimento si compatti normalmente. La pressione normale si riferisce quindi alla pressione interstiziale in formazioni in cui la pressione interstiziale segue un gradiente idrostatico:

$$PP = PP_0 + k(Z - Z_0) \quad (8)$$

Per entrambi i pozzi verticali del campo Cornegliano sono disponibili numerose misurazioni della pressione interstiziale nel giacimento e nell'overburden.

Le misurazioni MDT indicano che il gradiente di pressione interstiziale è idrostatico, pari a 0,45 psi/ft nell'overburden. All'interno del giacimento è stato rilevato un gradiente costante pari a 0,36 psi/ft (**Figura 11**). Inizialmente, è stata prevista una leggera sovrappressione in prossimità del giacimento (roccia di copertura), come desumibile dalla **Figura 11** (prime due tracce in entrambi i pozzi). Osservazioni successive, effettuate durante la perforazione nei cluster A e B, non hanno tuttavia corroborato questa ipotesi. Per il campo Cornegliano è stato ipotizzato un gradiente costante di 0,45 psi/ft (pressione idrostatica) nell'overburden fino a Top B1.

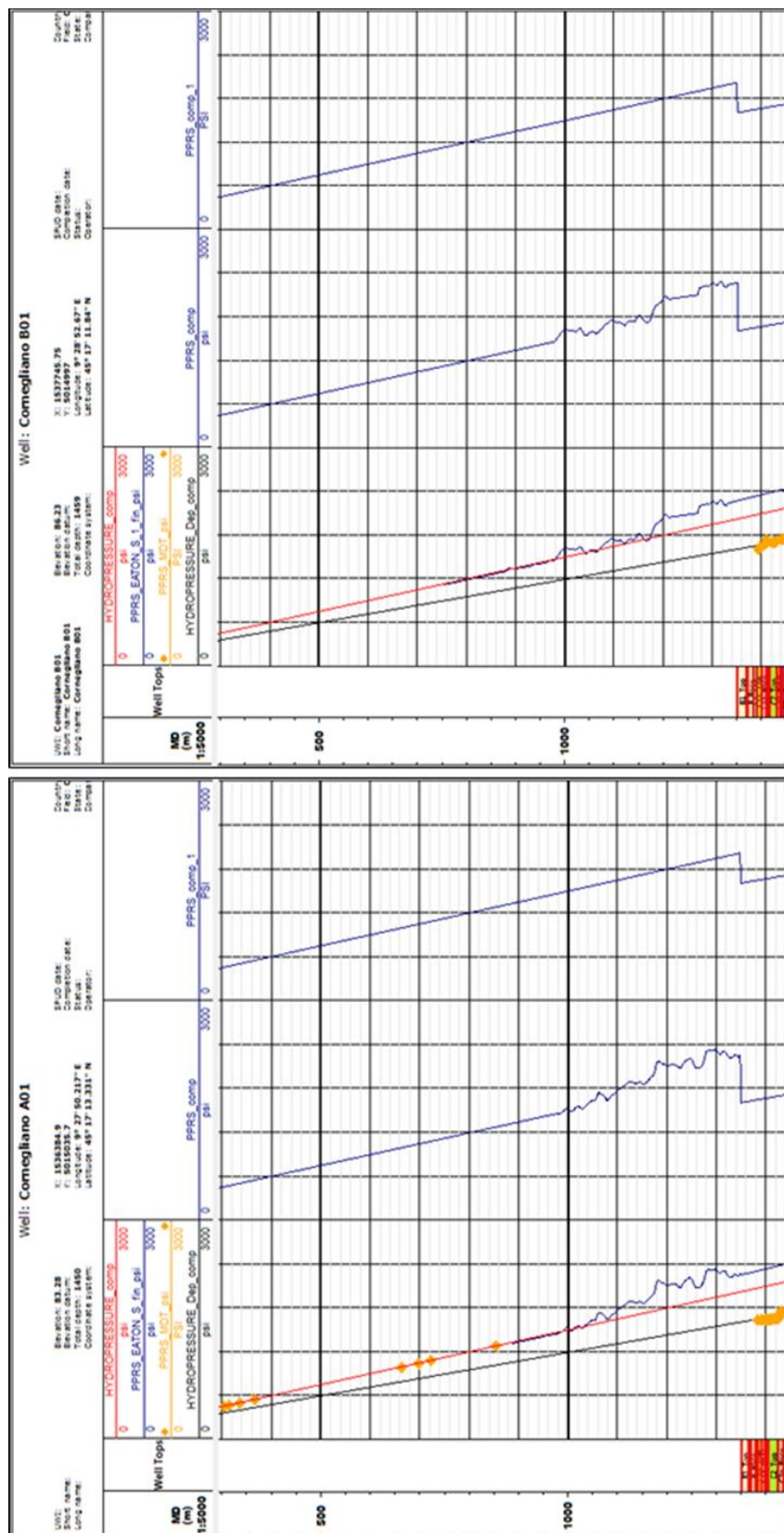


Figura 11. Misurazioni della pressione interstiziale nei pozzi A01 e B01.

2.4.2.3 Sforzo di copertura

Lo sforzo verticale applicato alla sommità del cubo elementare di roccia è pari al peso della colonna verticale di roccia sopra di esso e, per questo motivo, è spesso denominato “sforzo di copertura”. Lo sforzo di copertura a ogni profondità considerata è la pressione esercitata dal peso dei sedimenti sovrastanti e può essere calcolato integrandone la densità:

$$\sigma_v = g \int_0^{TVD} \rho_b(z) dz \quad (9)$$

In assenza di misure dirette della densità o se tali misure non partono dalla superficie, possono essere utilizzate equazioni empiriche per generare una curva di densità artificiale.

Per il presente studio, è stata estrapolata una densità artificiale fino alla linea dei fanghi utilizzando tre punti di controllo:

$$\rho_{extrapolated} = \rho_{mudline} + A_0 \times (TVD - AirGap - WaterDepth)^\alpha \quad (10)$$

Lo sforzo di copertura è stato quindi derivato dall'integrazione del log di densità (artificiale misurata) lungo entrambi i pozzi analizzati. Considerata la buona copertura del log di densità, la stima degli sforzi verticali è stata derivata quasi completamente dall'integrazione del log di densità con una estrapolazione ridotta alle profondità minori.

2.4.2.4 Sforzi orizzontali

Gli sforzi orizzontali sono stati calcolati considerando la teoria poroelastica [3]. Per le rocce con comportamento lineare elastico e isotropo, il calcolo dello sforzo orizzontale coinvolge il modulo di Young, il rapporto di Poisson, la costante di Biot α (assunta pari a 1 nel presente studio), lo sforzo litostatico verticale σ_v (overburden), la pressione interstiziale P_p , le deformazioni orizzontali minima e massima ε_h e ε_H (denominate deformazioni tettoniche). Ovvero:

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_h + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_H \quad (11)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_h + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_H \quad (12)$$

Le deformazioni tettoniche in (11) e (12) fungono da parametri di calibrazione per prevedere gli sforzi orizzontali. Benché abbiano un chiaro significato meccanico (sono condizioni al contorno: la compressione o l'allungamento laterale imposti dai carichi tettonici), la loro stima non è associata a prove di laboratorio o misurazioni in loco. Tali deformazioni sono utilizzate per correggere gli sforzi tenendo conto delle condizioni locali imposte dalla geologia, come, per esempio, dai carichi tettonici (ovvero l'allungamento o la compressione laterale), dalla diagenesi (ovvero il sovraconsolidamento), ecc. Questo processo corrisponde al loop di iterazione finale mostrato in **Figura 7** prima della convalida dell'analisi WBS.

Durante il processo di calibrazione, lo sforzo orizzontale minimo (denominato anche pressione di chiusura) nel pozzo B01 è stato confrontato con i risultati della prova MDT [2] per verificare la coerenza del modello tensionale.

L'identificazione del gradiente dello sforzo orizzontale massimo è più complessa poiché non esiste una misura diretta utilizzabile per ottenerne il valore. La disponibilità di elaborazioni soniche 3D (scanner sonico) può aiutare a calibrare lo sforzo orizzontale massimo o a dedurre uno squilibrio probabile tra gli sforzi orizzontale minimo e massimo osservando l'anisotropia delle proprietà soniche indotta dagli sforzi. Per i pozzi A01 e B01, non è stato possibile eseguire un'elaborazione sonica 3D avanzata e lo sforzo orizzontale massimo è stato stimato dai modelli MEM e dall'analisi WBS imponendo uno squilibrio degli sforzi $S_{\text{igh_max}}/S_{\text{igh_min}} > 1$ attraverso i termini tettonici nelle equazioni poroelastiche al fine di prevedere le rotture delle perforazioni dei pozzi osservate dal confronto con le letture dei caliper.

Sono stati inoltre calcolati il limite inferiore per lo sforzo orizzontale minimo e il limite superiore per lo sforzo orizzontale massimo assumendo che lo sforzo di taglio massimo locale sia determinato dalla resistenza a taglio della formazione, caratterizzata dal criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Supponendo che lo sforzo verticale sia uno sforzo principale, i limiti degli sforzi orizzontali nel campo di tensione sono il limite inferiore dello sforzo orizzontale minimo e il limite superiore dello sforzo orizzontale massimo.

Le analisi in letteratura [4] indicano che l'orientamento medio regionale dello sforzo massimo è 20° N (**Figura 12**). In particolare, Pierdominici et al (2005) indicano che *"è stata eseguita un'analisi dettagliata delle rotture in 36 pozzi profondi della regione Lombardia [...] I risultati, in termini di direzioni S_{hmin} , rivelano un pattern molto complesso caratterizzato da orientamenti non omogenei correlati a un campo tensione non uniforme"*. Questa complessità è principalmente associata a proprietà geologiche come la distribuzione delle faglie e gli orizzonti. Questa osservazione enfatizza l'importanza di una caratterizzazione più dettagliata dello stato di tensione nel campo Cornegliano in termini di descrizione spaziale 3D. Questo aspetto verrà sviluppato nel corso del modellamento geomeccanica 3D.

I risultati del modellamento degli sforzi sono presentati in **Figura 13** e in **Figura 14**. Il modellamento degli sforzi fa riferimento allo stato tensionale attuale (2018) e include la produzione del giacimento, Strati di Caviaga. Come osservabile, il regime globale degli sforzi risultante è un regime estensionale normale ($S_{\text{igh}} < S_{\text{igH}} < S_{\text{igV}}$).

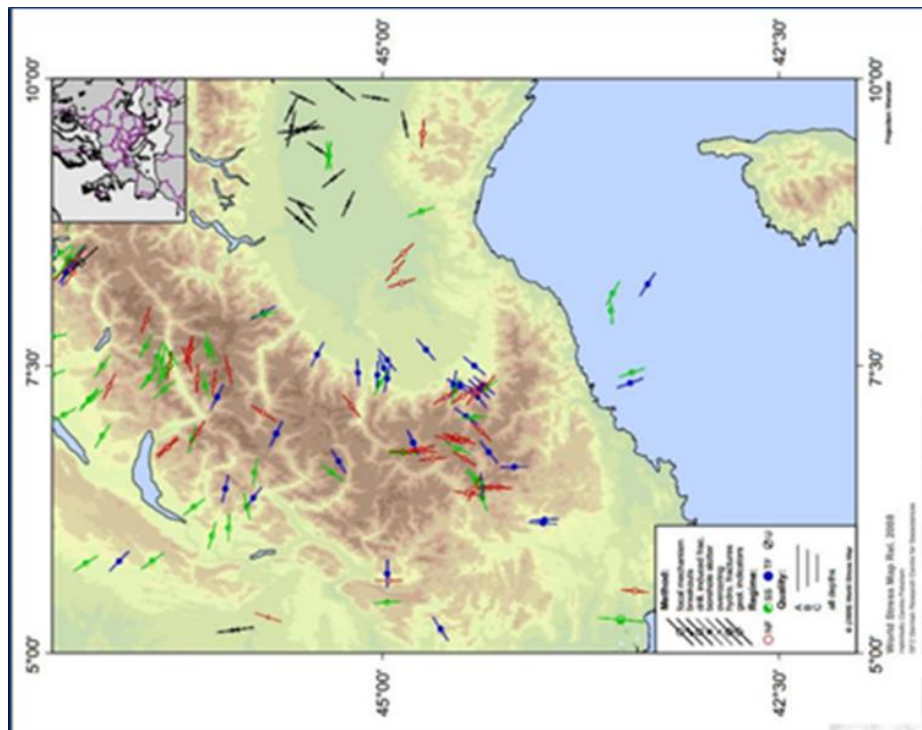


Figura 12. Orientamento degli sforzi ottenuto dalla World Stress Map [1] e da Pierdominici et al. (2005).

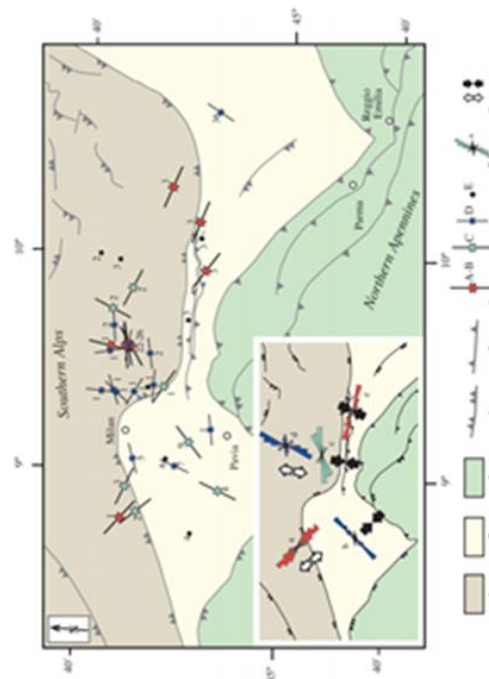


Fig. 7. S_{max} orientations from borehole breakout analysis compared to the tectonic structures. 1 – Southern Alps tectonic units; 2 – Po Plain-Adriatic foreland; 3 – Apennines tectonic units; 4 – Pre-Middle Pliocene thrusts; 5 – Middle Pliocene-Pleistocene thrusts; 6 – S_{max} directions and well quality ranks; 7 – Rose plot of S_{max} directions of well groups indicated by the letter (see fig. 4) where different colours stand for quality as in point 6; 8 – estimated tectonic regimes: extension and compression respectively. Tectonics modified from Pieri and Groppi (1981) and CNR-PFG (1991).

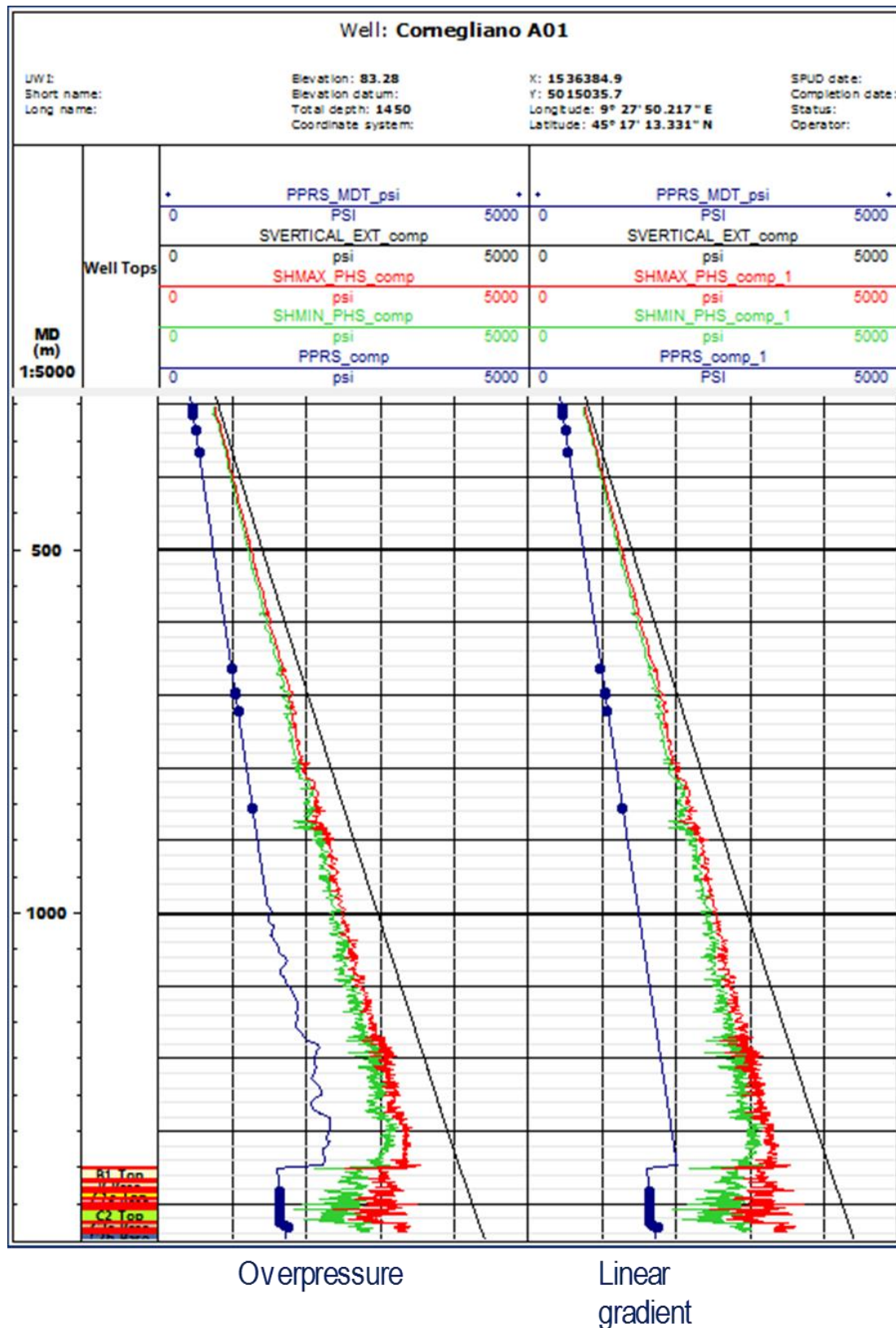


Figura 13. Modellamento degli sforzi nel pozzo A01. I punti sono valori di calibrazione di prove MDT (pressione).

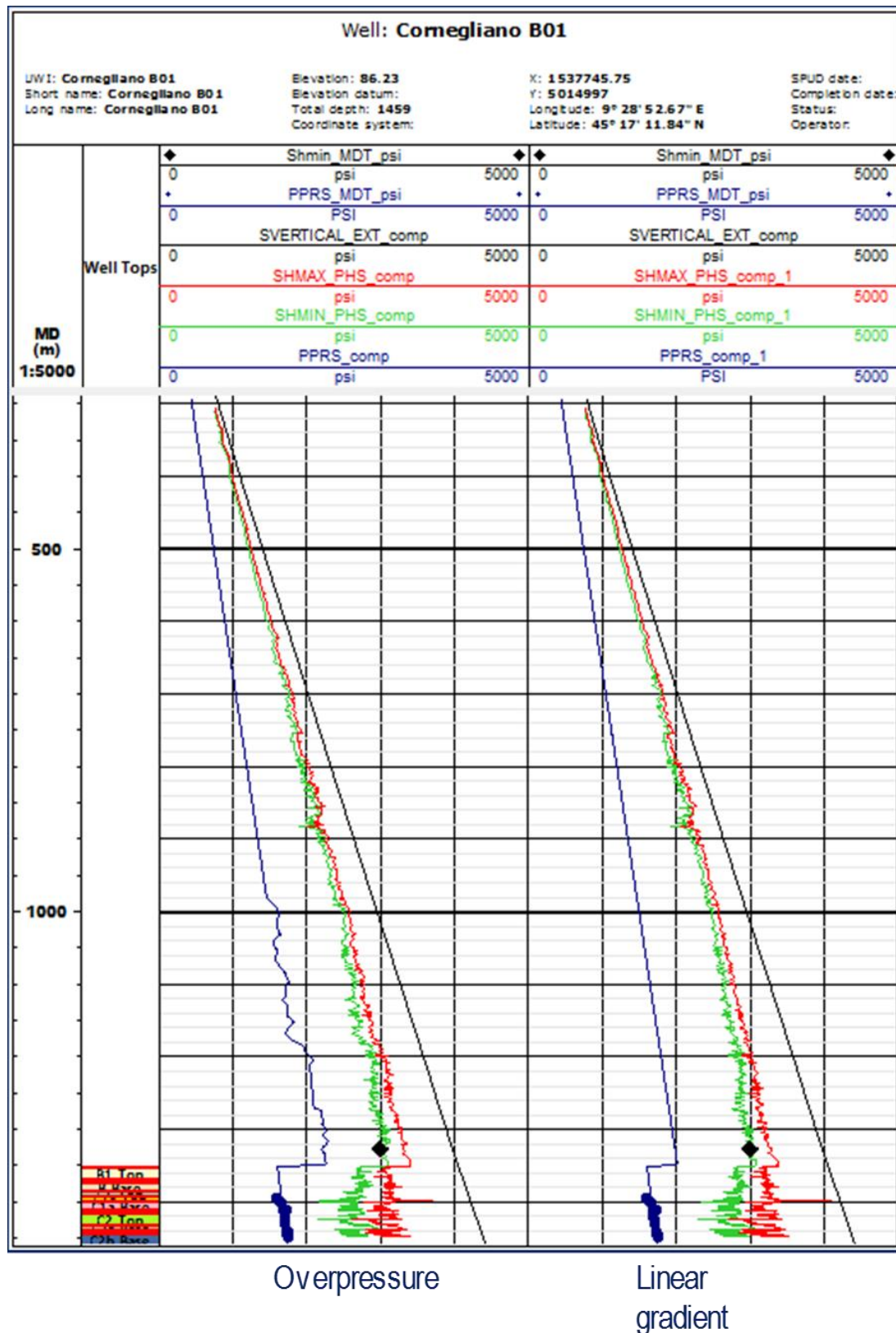


Figura 14. Modellamento degli sforzi nel pozzo B01. I punti sono valori di calibrazione di MDT (pressione e sforzi).

2.4.2.5 Analisi della stabilità delle perforazioni dei pozzi (WBS)

Utilizzando le proprietà calcolate per le rocce, la pressione interstiziale, gli sforzi verticali e orizzontali, la validità del modello tensionale derivato dal modello MEM deve essere convalidata rispetto ai dati registrati durante la perforazione, alle rotture o alle fratture da trazione indotte osservate o desunte dai caliper e dai log di immagini.

Gli sforzi principali che si concentrano attorno alla perforazione dei pozzi (sforzi in prossimità della perforazione del pozzo), generati dagli sforzi più lontani nel campo nelle equazioni (11) e (12), sono utilizzati per determinare se le pareti delle perforazioni abbiano subito o meno una rottura. Gli sforzi in prossimità della perforazione del pozzo sono ottenuti utilizzando le equazioni di Kirch (**Figura 15**). Possono anche essere presi in considerazione la deviazione e l'azimut dei pozzi. L'instabilità delle perforazioni dei pozzi è causata da due tipi principali di rotture: a trazione o a taglio. La rottura a taglio è generalmente dovuta a un peso ridotto dei fluidi; la rottura a trazione è causata da un peso elevato dei fluidi.

Esistono vari metodi per prevedere la rottura delle rocce (o l'instabilità delle perforazioni dei pozzi). Nel presente studio, la rottura a taglio è stata identificata considerando criterio di rottura di Lade (Lade, 1982). La rottura a trazione si verifica quando lo sforzo circolare di trazione sulle pareti della perforazione supera la resistenza a trazione della roccia. Il risultato più importante dell'analisi della stabilità delle perforazioni dei pozzi è il peso (densità) dei fluidi (fanghi) di perforazione (Mud Weight Window – MWW), **Figura 16**.

Vi sono quattro limiti che definiscono il peso dei fluidi:

- **Pressione interstiziale**: Se il peso dei liquidi (pressione nella perforazione) è minore della pressione interstiziale durante la perforazione, è ragionevole attendersi scavamenti, dilavamenti della perforazione del pozzo o kick. Il pistonaggio (swabbing), che può ridurre la pressione istantanea nei fori al di sotto della pressione interstiziale, può avere un effetto simile. Il limite di pressione interstiziale definisce il peso dei fluidi minimo richiesto per garantire la sicurezza idraulica.
- **Rottura (breakout)** (pressione minima di rottura a taglio): Al di sotto di questo peso dei fluidi, è probabile che si verifichi la rottura a taglio della roccia e, pertanto, il cedimento e il danneggiamento della perforazione del pozzo. Quanto minore è il peso dei fluidi rispetto questo valore, tanto più grave sarà la rottura. Dal punto di vista della perforazione, un certo livello di danneggiamento delle perforazioni dei pozzi è gestibile e tollerabile durante le operazioni.
- **Perdita di fluidi** (sforzo orizzontale minimo): In fratture naturali o in altre fenditure conduttive esistenti lungo la perforazione del pozzo o in presenza di una zona di perdita di circolazione altamente permeabile, un peso dei fluidi superiore allo sforzo minimo principale locale tenderà a riaprire le fratture/fenditure naturali causando una perdita di fluido di perforazione nella formazione. In formazioni altamente fratturate, ogni pressione nelle perforazioni maggiore dello sforzo orizzontale minimo può provocare rotture geometriche e movimenti (nel foro) di blocchi altrimenti intatti. Una ECD eccessiva o fenomeni di surge durante l'estrazione della trivella dal foro può avere un effetto simile. La perdita di fluidi è il peso massimo dei fluidi consentito per la sicurezza idraulica della perforazione del pozzo.
- **Rottura (breakdown)**: Quando la pressione dei fluidi è maggiore della pressione di rottura della formazione, può verificarsi una rottura a trazione nella roccia intatta e la frattura idraulica delle pareti delle perforazioni dei pozzi. Il calcolo del gradiente di rottura è basato su criteri di rottura a trazione.

I risultati delle analisi WBS dei pozzi A01 e B01 sono mostrati in **Figura 17** e in **Figura 18**. La MMW del tracciato 7 mostra, in termini di peso equivalente dei fluidi:

- il gradiente della pressione interstiziale in grigio.
- il profilo del gradiente rottura a taglio in rosso, calibrato rispetto la deformazione della perforazione del pozzo ottenuto da caliper (traccia 10).
- il profilo del gradiente degli sforzi orizzontali minimi (propagazione della frattura o pressione di fratturazione) in azzurro, calibrato con riferimento ai risultati delle prove microfrac nel pozzo B01.
- il profilo del gradiente di rottura a trazione (pressione di rottura della formazione) in blu scuro.

Il peso dei fluidi (MW) statico utilizzato nella perforazione dei pozzi A01 e B01 è rappresentato come una linea blu tratteggiata in entrambe le MMW (**Figura 17** e **Figura 18**). Nel caso di pozzi verticali, la densità circolante equivalente (Equivalent Circulating Density - ECD) non può essere molto superiore al peso dei fluidi (MW) statico. I risultati sono stati confrontati con dati forniti da caliper (tracciato 10). Tali dati sono le sole osservazioni disponibili riguardanti la deformazione delle perforazioni dei pozzi. Le rotture a taglio previste (traccia 8) sono indicate come zone rosse di ampiezza variabile in termini di angolo di perforazione (intervallo compreso tra 0° e 360°). Globalmente, le rotture sono in buon accordo con le letture dei caliper e corroborano il modello tensionale stimato. Sono state previste anche rotture a trazione (traccia 9), tuttavia questa previsione non è confermabile in assenza di immagini dei fori di perforazione. Durante la perforazione nello strato di copertura (Argille del Santerno), si è osservata la generazione di danneggiamenti del foro del pozzo gestibili durante le operazioni. Infatti, in questa zona, il peso dei fluidi (MW) statico attraversa l'area gialla corrispondente alle rotture a taglio (rotture).

2.4.3 Conclusioni dell'analisi dei singoli pozzi

I principali risultati dell'analisi dei singoli pozzi sono:

- I log disponibili per i pozzi A01 e B01 (densità, GR, CAL, porosità, velocità delle onde compressionali Vp e di taglio Vs) sono stati sufficienti per il modellamento geomeccanico 1D, consentendo una buona copertura lungo i pozzi. I log di misurazione dei diametri (caliper) e i dati registrati durante la perforazione sono stati utilizzati per la calibrazione della stabilità delle perforazioni dei pozzi.
- Sono state apportate modifiche minori ai log per ricostruire intervalli non acquisiti e correggere eventuali letture errate.
- Per il modellamento delle proprietà meccaniche, sono state distinte le principali litologie utilizzando GR e le informazioni fornite da relazioni geologiche e di mud logging e, ai fini del calcolo di tali proprietà, per ogni litologia sono state utilizzate correlazioni specifiche.
 - La correlazione tra il modulo di Young dinamico e il modulo di Young statico è stata calibrata con valori ottenuti da prove di laboratorio laddove disponibili (roccia di copertura e riserva) e utilizzando valori di riferimento reperibili in letteratura (per rocce di copertura poco profonde).
 - La correzione per la conversione del rapporto di Poisson da dinamico a statico è stata presa in considerazione sia nelle rocce argilla-sostenute che grano-sostenute. Il rapporto di Poisson statico è stato derivato dalla sua controparte dinamica mediante calibrazione con dati di prove di laboratorio (roccia di copertura e riserva) e utilizzando valori di riferimento reperibili in letteratura (per rocce di copertura poco profonde).

- La calibrazione delle proprietà resistenza alla compressione semplice (Unconfined Compression Strength - UCS) e angolo di attrito (Friction Angle - FANG) nella roccia di copertura e nel giacimento è stata eseguita sulla base dei valori ottenuti da prove di laboratorio sui campioni acquisiti (carote). Per la resistenza a trazione (TSTR), in mancanza di misurazioni di laboratorio dirette, si sono ipotizzati valori derivati da statistiche e correlazioni proprietarie interne o comunque reperibili nella letteratura specifica. Nello specifico per la resistenza a trazione (TSTR) della roccia si è ipotizzato un valore pari al 10% di UCS. Nel caso di assenza totale di dati relativi a campioni (carote), sono state utilizzate correlazioni interne o comunque reperibili nella letteratura specifica per l'insieme delle proprietà meccaniche, nello specifico: elastiche (modulo di Young e coefficiente di Poisson) e di resistenza (UCS, angolo di attrito e resistenza a trazione).
- Ove possibile, il modello tensionale e la pressione di formazione sono stati stimati e calibrati in maniera sistematica facendo riferimento alle misurazioni disponibili, nello specifico: prove di pressione MDT in A01 e B01 e una prova di tensione MDT nel pozzo B01 nella roccia di copertura (cap rock) (1327 m TVD). Il modello di stabilità dei pozzi A01 e B01 è in buon accordo con le osservazioni (i dati registrati durante la perforazione e misurazioni in pozzo).



Drilled Well

Far field stresses

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_x + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \epsilon_y$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \epsilon_x + \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_y$$

Boundary Conditions (Tectonics)

Near Wellbore Stresses

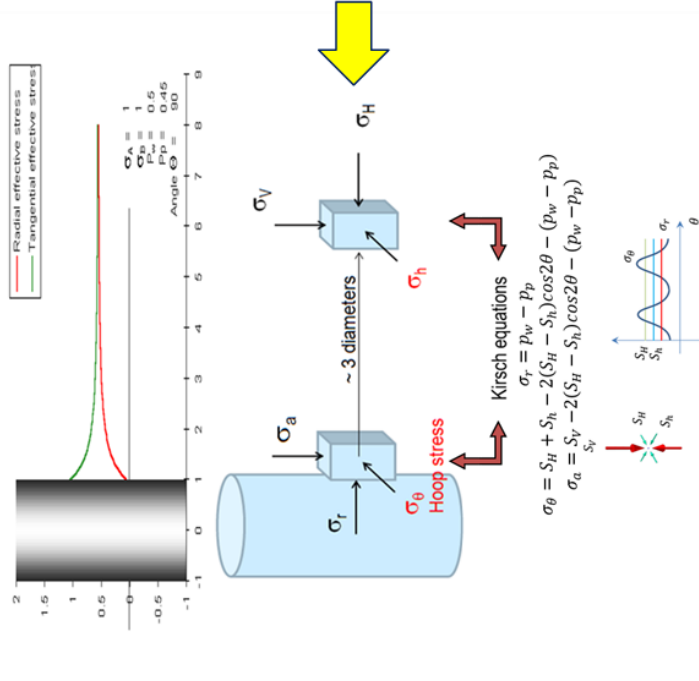


Figura 15. Calcolo degli sforzi attorno alla perforazione di un pozzo ipotizzando un comportamento isotropo delle rocce.

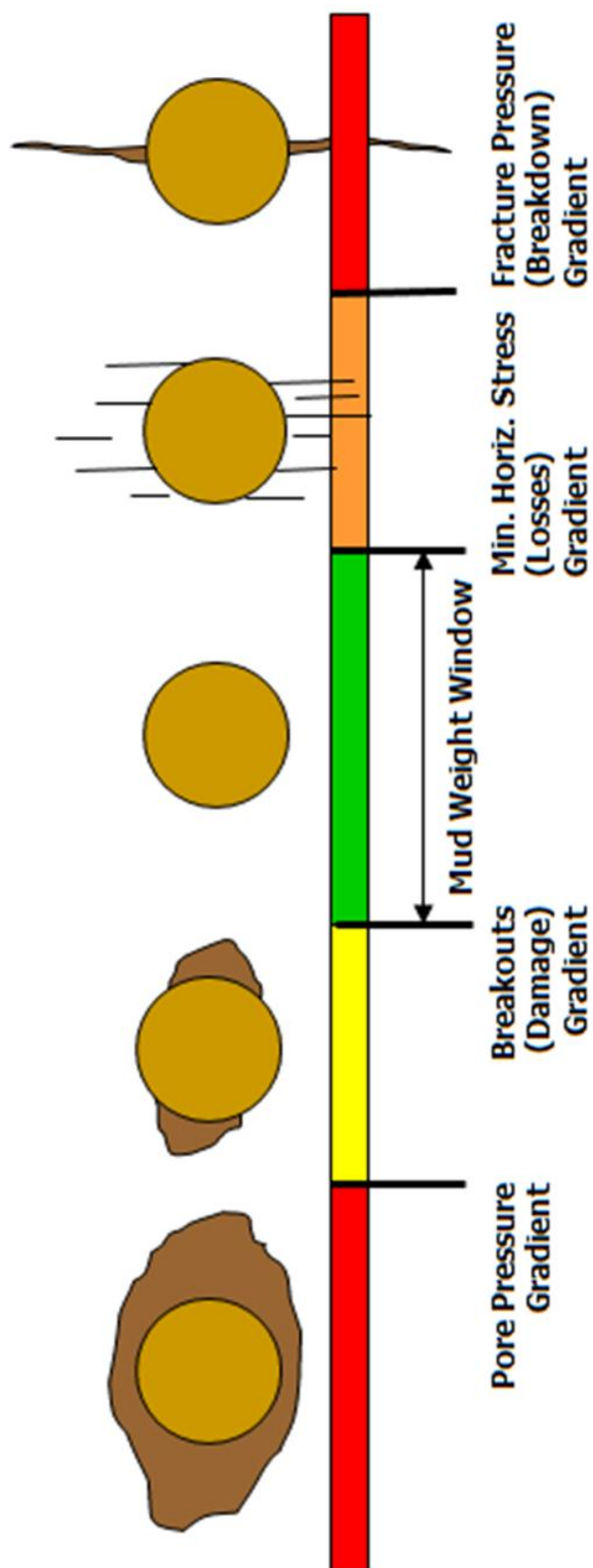


Figura 16. Definizione di gradienti di tensione critici del peso dei fluidi di perforazione (MWW).

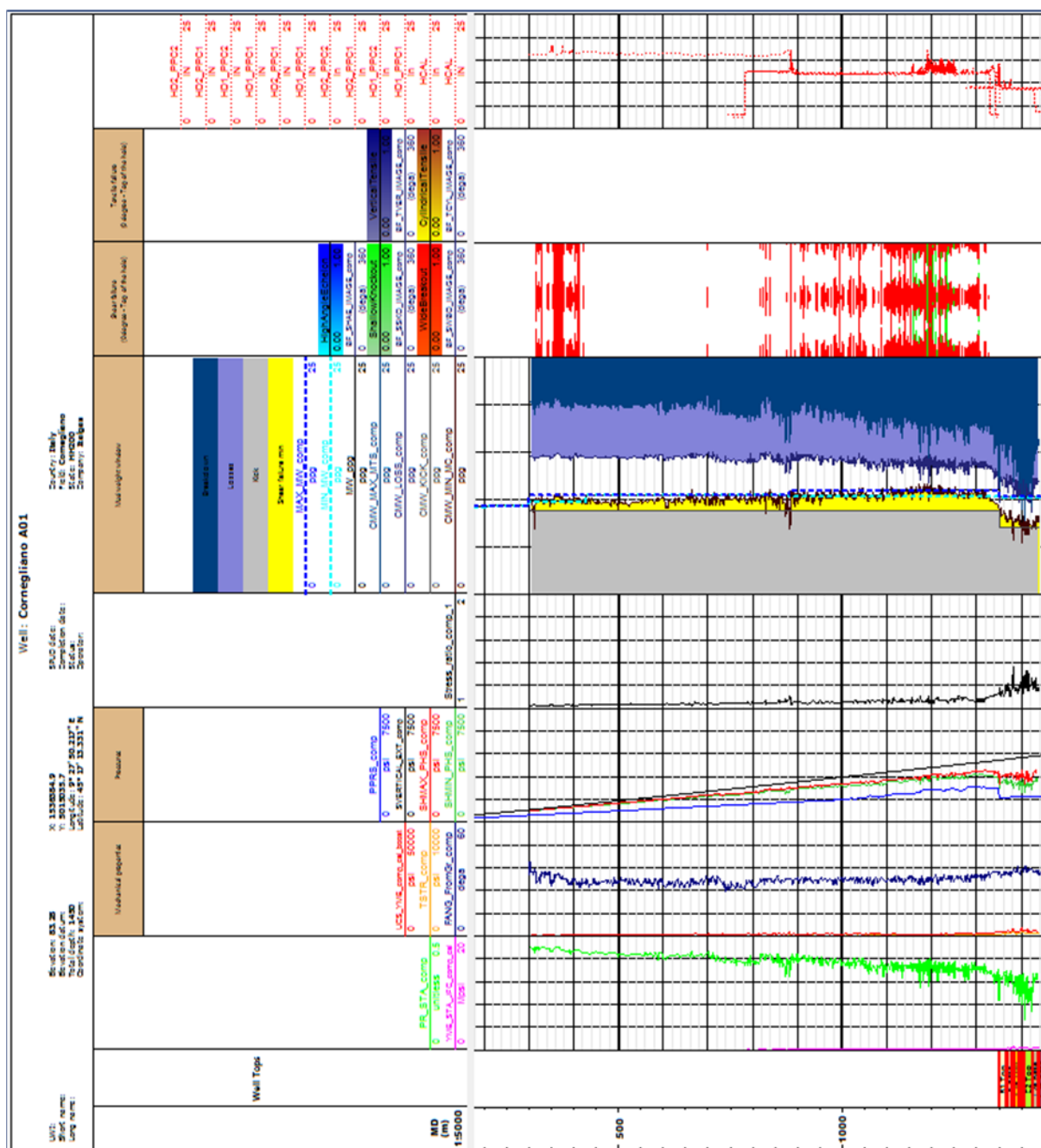


Figura 17. Analisi di stabilità della perforazione e del peso dei fluidi di perforazione (MWW) per il pozzo A01 del giacimento Cornegliano.

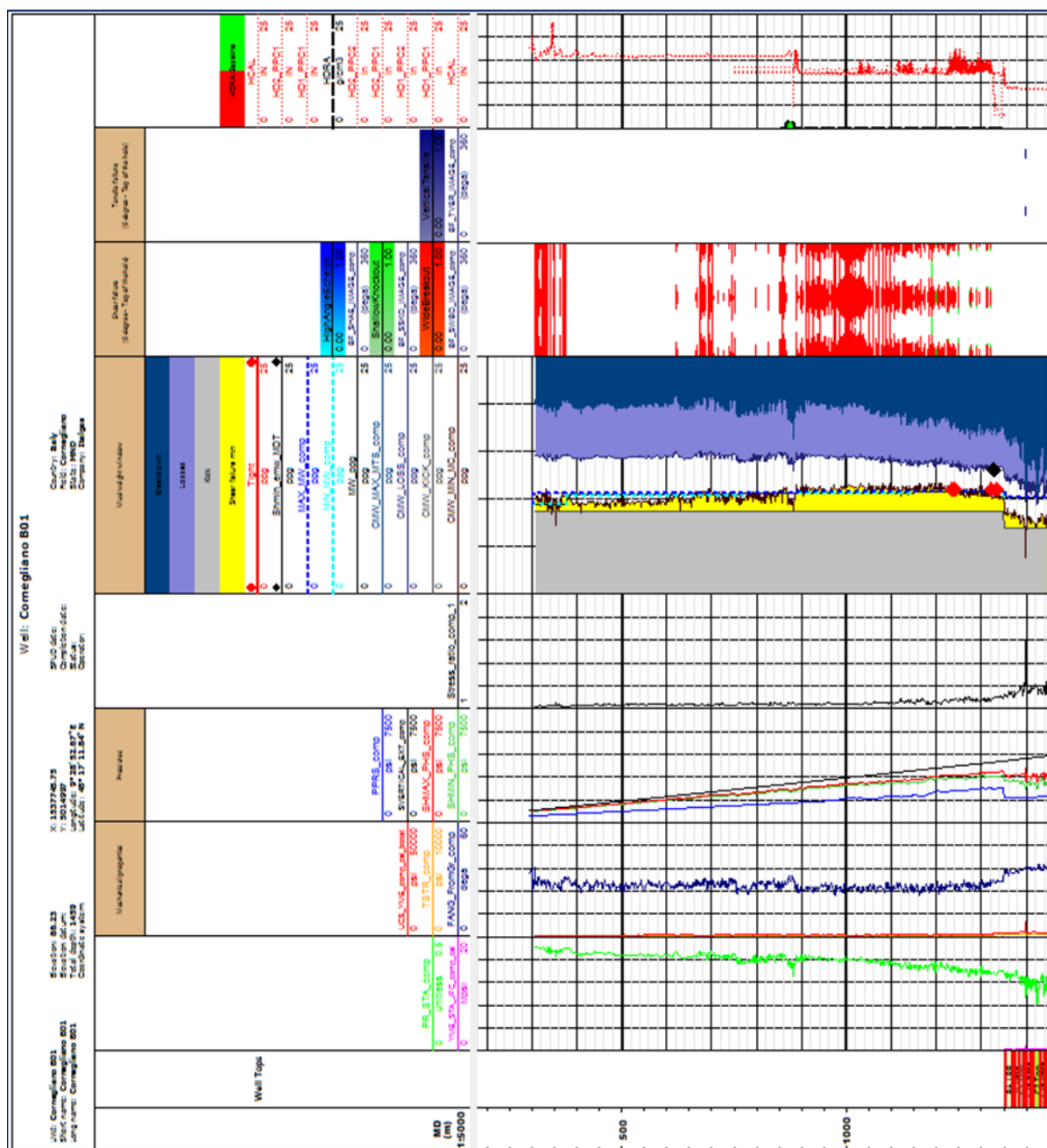


Figura 18. *Analisi di stabilità della perforazione e del peso dei fluidi di perforazione (MWW) per il pozzo B01 del giacimento Cornegliano.*

2.5 Modellamento geomeccanica 3D

Il modellamento geomeccanico 3D è stato eseguito utilizzando il metodo a elementi finiti [2] per mezzo del codice a elementi finiti Petrel Geomechanics e VISAGE. In generale, il processo prevede i passaggi seguenti:

1. Creazione di un modello strutturale del giacimento utilizzando orizzonti di formazione.
2. Integrazione del modello strutturale del giacimento aggiungendo overburden e underburden. L'integrazione è eseguita in modo da calcolare in maniera accurata gli sforzi per tutta la profondità dell'overburden.
3. Utilizzando le proprietà elastiche geomeccaniche e di resistenza delle rocce del modello MEM 1D per l'upscaling lungo i pozzi e la popolazione delle proprietà 3D.
4. Integrazione di faglie, se presenti.
5. Calcolo dello stato tensionale inizializzando il modello in uno stato di equilibrio utilizzando le condizioni al contorno di spostamento sulle superfici laterali. Per deformare il reticolo, sono utilizzate le deformazioni orizzontali minima e massima definite nei modelli MEM 1D.
6. L'esecuzione di vari cicli di simulazione, regolando (se necessario) iterativamente le condizioni di deformazione al contorno e confrontando i risultati relativi agli sforzi lungo i pozzi forniti dal modello MEM 1D con quelli calcolati mediante i modelli 3D. Selezione del modello più fedele.

Il flusso di lavoro generale per il modellamento geomeccanica 3D utilizzato per il presente studio è già stato presentato e descritto in **Figura 6** e nella **Sezione 2.3**. Si ricorda che il flusso di lavoro integrato è costituito da 4 fasi:

- v. Screening dei dati: durante questa fase sono raccolte le informazioni disponibili.
- vi. Integrazione dei dati: consiste nella definizione di un modello strutturale statico che include informazioni ottenute da attributi geologici e dai profili delle proprietà dei singoli pozzi (parametri meccanici).
- vii. Analisi: durante questa fase gli sforzi attuali e la loro evoluzione nel tempo per effetto delle variazioni di pressione determinate dal modello del giacimento sono calcolati imponendo carichi tettonici e pressioni interstiziali.
- viii. Applicazione: durante questa fase, i risultati derivati dai cubi degli sforzi e delle proprietà sono utilizzati per applicazioni di ingegneria dei pozzi correlate all'integrità dei pozzi, al loro posizionamento, alla stimolazione (per esempio la frattura idraulica), alla produzione, all'integrità del campo (per esempio all'analisi della compattazione, della subsidenza, dell'integrità della roccia di copertura, della riattivazione delle faglie).

Per definire il modello geomeccanico (3D) del giacimento, sono stati utilizzati i risultati dell'analisi geomeccanica (1D) lungo il pozzo (profili delle proprietà meccaniche, profili della pressione e delle tensioni) in combinazione a informazioni strutturali (interpretazioni sismiche basate sul rilievo sismico 3D effettuato nel 2017 nell'area della Concessione, orizzonti e faglie).

I dati utilizzati per la generazione del modello 3D sono:

- a) Dati dei pozzi (ovvero ubicazione e traiettorie dei pozzi e log delle proprietà meccaniche per i due pozzi A01 e B01).
- b) Interpretazione sismica, orizzonti e interpretazione delle faglie.

2.5.1 Dati dei pozzi e sismici

I dati dei pozzi sono stati estratti dai risultati dello studio WBS per i due pozzi A01 e B01 (vedere sezione 2.4). Inoltre, sono state incluse nel modello 3D anche le traiettorie di altri pozzi deviati realizzati nei cluster A e B. Il giacimento si trova alla sommità di una anticlinale orientata in direzione E-O, a una profondità compresa tra 1300 e 1700 m sotto il piano campagna, nella formazione denominata Strati di Caviaga.

Come descritto nella precedente **Sezione 2.2** i dati sismici (ottenuti dal rilievo sismico 3D eseguito nel 2017 nell'area della Concessione) consistevano ovvero in interpretazioni di orizzonti 3D per tutte le principali unità stratigrafiche dalla superficie topografica fino alla zona C3_base (**Figura 19**) e in interpretazioni di faglie situate nell'area di interesse (**Figura 20**). Sono stati inoltre forniti risultati dell'inversione sismica in termini di cubo di impedenza acustica (AI). Quest'ultimo è stato utilizzato come dato di input secondario per il modellamento delle proprietà 3D al fine di rilevare l'eterogeneità laterale delle proprietà meccaniche.

Gli orizzonti interpretati coprono un'area rettangolare che si estende per 6802 m in direzione E-O e per 2850 m in direzione N-S. In totale, sono state prese in considerazione 25 faglie. Tutte le faglie sono delimitate dagli orizzonti C3_base e B1_Top, mentre poche di esse penetrano all'interno della formazione Argille del Santerno (roccia di copertura).

2.5.2 Costruzione del modello geomeccanico 3D

Questa sezione presenta il metodo utilizzato per realizzare il modello geomeccanico 3D del campo Cornegliano e la metodologia di modellamento delle proprietà.

La dimensione e l'orientamento del modello globale sono definiti in base alla posizione spaziale dei pozzi e dell'area di stoccaggio poiché i confini del modello devono essere quanto più distanti possibile dai bordi del giacimento al fine di evitare effetti di contorno in termini di sforzi e deformazioni calcolati. Ciò implica che il modello strutturale disponibile deve essere integrato in un modello più grande aggiungendo un underburden e sideburden. Normalmente, l'underburden è aggiunto in modo che gli sforzi o gli spostamenti orizzontali applicati ai confini laterali del modello siano correttamente trasferiti per tutto il modello senza generare tensioni dovute alla potenziale instabilità del modello stesso. I sideburden sono inclusi per riprodurre correttamente la condizione di spostamenti trascurabili lontano dal giacimento. Inoltre, hanno la funzione di trasferire senza interruzioni gli sforzi o gli spostamenti orizzontali applicati ai confini laterali del modello per riprodurre le condizioni iniziali dettate dalla tettonica.

Per il modello del campo Cornegliano, i limiti per i sideburden sono stati impostati pari a due volte le dimensioni del giacimento nelle direzioni E-O e N-S rispettivamente. La base dell'underburden è stata impostata a una profondità di 4000 m (TVD), corrispondente a 2,8 volte la profondità media dell'orizzonte di base del modello strutturale (C3_Base). La geometria finale del modello è mostrata in **Figura 21**. Il modello si estende per circa 33 km in direzione E-O e per 25 km in direzione N-S.

La mesh a elementi finiti utilizzata per discretizzare lo spazio 3D è composta da parallelepipedi a 8 nodi (mattoni). La mesh è particolarmente densa nel giacimento e nell'overburden e diventa man mano più grossolana quanto più ci si allontana dalla zona di interesse. Le dimensioni orizzontali degli elementi mattoni sono state impostate a 15 m, nelle direzioni E-O e N-S, corrispondenti rispettivamente alle direzioni X e Y di un sistema di riferimento cartesiano. La risoluzione verticale della mesh all'interno del giacimento è di circa 5 m e maggiore fuori dal giacimento, nell'overburden e nell'underburden. Il modello 3D finale è costituito da 8.411.850 celle (N_c) e da 70.139.520 gradi di libertà ($DOF = 3 \times N_{nodi}$).

2.5.3 Modellamento delle proprietà meccaniche e modellamento costitutiva

I dati derivati dal modello geomeccanico post-perforazione di A01 e B01 (**Figura 9** e **Figura 10**) sono stati utilizzati per popolare il modello 3D con le proprietà meccaniche.

Queste ultime (densità, costanti elastiche e parametri di resistenza) sono state scalate nel modello in modo che a tutte le celle attraversate dalle traiettorie dei pozzi A01 e B01 sia assegnato un valore medio calcolato dai log disponibili. A titolo di esempio, la **Figura 22** mostra il confronto tra le proprietà scalate e derivate dal log per il pozzo A01. È evidente una buona corrispondenza tra i log 1D e le proprietà scalate, confermando che la risoluzione verticale del modello è sufficiente a rispecchiare l'eterogeneità verticale delle proprietà meccaniche.

Come anticipato, per rilevare l'eterogeneità laterale delle proprietà meccaniche, è stato utilizzato il cubo di impedenza acustica $AI = \rho V_p$ (dove ρ è la densità apparente e V_p è la velocità delle onde di compressione). La **Figura 23** mostra la variabilità del cubo AI lungo la sezione E-O del modello passante attraverso la cresta del giacimento. La **Figura 24** mostra il rapporto tra AI e il modulo di Young statico e il rapporto di Poisson stimato in A01 e B01. Come osservabile, è possibile identificare una buona correlazione tra le proprietà elastiche derivate a scala di pozzo e l'AI a scala di giacimento. Sulla base di queste tendenze, il cubo AI è stato utilizzato come input secondario per l'algoritmo applicato per la propagazione delle proprietà 3D. L'eccellente accordo tra le proprietà elastiche calcolate a scala di pozzo e le proprietà scalate a scala di giacimento è desumibile confrontando i risultati in **Figura 24** e in **Figura 25**.

Le proprietà derivate nel giacimento e nell'overburden sono state estese dai limiti del giacimento (zona blu nella **Figura 21**) fino ai confini del modello per i sideburden. Per l'underburden (base), per il quale non sono disponibili dati, è stato utilizzato un valore costante per definire la densità e le due proprietà elastiche (modulo di Young, rapporto di Poisson). **Figura 26** mostra i cubi finali delle proprietà derivate per il modello 3D del campo Cornegliano.

Le leggi costitutive utilizzate per il modellamento geomeccanico sono riepilogate in **Tabella 5**. Per le masse di roccia, è stato considerato un comportamento perfettamente elastoplastico ipotizzando un comportamento elastico isotropo e la validità del criterio di rottura di Mohr-Coulomb. I parametri elastici isotropi (modulo Young e rapporto di Poisson) e i parametri di resistenza (resistenza a compressione semplice UCS, resistenza a trazione e angolo di attrito interno) sono quelli ottenuti durante la modellamento delle proprietà (**Figura 26**).

Zona	Comportamento elastico	Comportamento plastico
Overburden	Elastico isotropo	Mohr-Coulomb (nessun indurimento)
Giacimento	Elastico isotropo	Mohr-Coulomb (nessun indurimento)
Underburden e sideburden	Elastico isotropo	-

Tabella 5. *Leggi costitutive*

2.5.4 Modellamento delle discontinuità

Zone discrete di debolezza, per esempio le faglie, possono essere modellate mediante elementi singoli con proprietà adeguate. L'approccio del simulatore VISAGE è l'adozione di un materiale "equivalente"

che combina i comportamenti della roccia intatta e delle discontinuità [8]. Il materiale “equivalente” è pertanto formulato “spalmando” l’influenza di ogni piano di faglia sul volume corrispondente che occupa.

Questo approccio ipotizza che, all’interno di ogni cella del reticolo intersecata da almeno piano di faglia, la massa di roccia sia costituita dal materiale della roccia intatta e dalla(e) faglia(e), **Figura 27**. Per i costituenti del materiale “equivalente”, la cui risposta considera l’interazione di tutti i componenti costitutivi, devono essere sviluppate relazioni adeguate. In ciascun elemento intersecato da uno o più piani di faglia, deve essere stabilito un sistema di coordinate (definito dall’asse normale al piano di faglia) per descrivere il materiale della roccia “equivalente” che dovrebbe essere in grado di tenere in considerazione la deformazione e il comportamento a rottura della roccia intatta e delle faglie. La differenza principale tra questi due componenti è che il piano di faglia consente spostamenti relativi. L’ipotesi fondamentale dietro all’approccio con materiale “equivalente” è che questi movimenti relativi, se divisi per la dimensione della cella del reticolo (S), possono essere considerati equivalenti a deformazioni in un continuum. Il tensore di deformazione globale totale in ogni cella del reticolo è calcolato sommando il tensore di deformazione globale per la roccia intatta a quello di ciascun piano di faglia. Ovvero:

$$\frac{\sigma}{E_{eq}} = \frac{\sigma}{E_{rock}} + \frac{\sigma}{E_{fault}} = \frac{\sigma}{E_{rock}} + \frac{\sigma}{K_n S} \quad (13)$$

$$E_{eq} = a E_{rock} \quad (14)$$

Si sottolinea che la rigidezza della faglia è definita sia nella direzione normale sia nella direzione di taglio (**Figura 27**), nello specifico:

$$K_n = \frac{1-a}{aS} E_{rock} \quad (15)$$

$$K_s = \frac{K_n}{2} \quad (16)$$

Per il campo Cornegliano, sono state fornite le geometrie delle faglie per il modello geomeccanico mappando l’interpretazione sismica 3D disponibile (25 faglie). La **Figura 28** mostra i piani di faglia generati (in alto) e gli elementi delle faglie corrispondenti (sotto) che sono stati integrati nel modello 3D come “elementi faglia”.

Per descrivere il comportamento delle faglie è stato utilizzato il criterio di rottura di Mohr-Coulomb con coesione trascurabile. Il comportamento non coesivo delle faglie è un’ipotesi piuttosto conservativa che è stata preferita considerando la mancanza di informazioni sulle proprietà meccaniche delle discontinuità. Questa è un’ipotesi piuttosto comune (per esempio [9]) che può essere resa meno conservativa e la cui influenza può essere indagata attraverso lo studio parametrico di modellamento in futuro.

Per ogni faglia, sono stati assegnati parametri di resistenza (coesione trascurabile, angolo di attrito e angolo di dilatanza). Le proprietà delle faglie sono state stimate sulla base delle proprietà della roccia intatta. Generalmente, l’angolo di attrito delle faglie ϕ_{fault} è assunto pari a una percentuale dell’angolo

di attrito della roccia intatta ϕ_{rock} (il valore tipico è $\phi_{fault} = 0,75 \phi_{rock}$). Nel caso del campo Cornegliano, il valore medio di ϕ_{rock} è pari a $30,6^\circ$, valore che determina $\phi_{fault} = 23^\circ$. Questo valore è minore dei coefficienti di attrito delle faglie indicati dalla letteratura (per esempio [9]). Infatti, il coefficiente di attrito delle faglie $\mu_{fault} = \tan \phi_{fault}$ varia tra 0,6 e 1,0 (ovvero i valori di ϕ_{fault} variano tra 31° e 45°).

L'ipotesi adottata per le faglie nel campo Cornegliano è piuttosto conservativa e i risultati descrivono il caso peggiore per quanto concerne l'analisi della stabilità delle faglie stesse. La **Tabella 6** mostra i valori finali utilizzati per le analisi numeriche. I risultati sono discussi nel paragrafo successivo.

Proprietà	Valore	Unità
Rigidezza normale	2500	bar/m
Rigidezza di taglio	1250	bar/m
Coesione	0,01	bar
Angolo di attrito	23	Gradi
Angolo di dilatanza	5	Gradi

Tabella 6. *Proprietà geomeccaniche delle faglie*

2.5.5 Risultati del modellamento degli sforzi: stato iniziale.

Per definire uno sforzo locale 3D rappresentativo, il modello è stato inizializzato in uno stato di equilibrio iniziale sotto l'azione del carico gravitazionale e di una compressione laterale contemporanea associata alla spinta tettonica attiva (**Figura 29**). La parte superiore del modello (piano campagna) non è vincolata, mentre per la superficie inferiore (base) del modello sono consentiti solo spostamenti orizzontali.

Il campo di pressione iniziale nel 2018 è stato assegnato a partire dai risultati di modellamento dinamica del giacimento disponibili e analogamente alle ipotesi effettuate nell'analisi geomeccanica 1D (**Sezione 2.4.2**). Al di fuori del giacimento, è stato utilizzato un gradiente idrostatico ($0,45 \text{ psi/ft} = 0,10 \text{ bar/m}$). Il cubo risultante è mostrato in **Figura 30**.

Dati ottenuti dalla letteratura ([4], [5]) indicano che lo sforzo orizzontale massimo è orientato approssimativamente in direzione 20° N (**Figura 12**). Il regime tensionale regionale è un regime estensionale normale ($\text{SigH} < \text{SigV}$). Al fine di generare lo stato tensionale iniziale nell'intero modello 3D, sono state prese in considerazione le condizioni di spostamento al contorno. I valori medi delle deformazioni laterali a compressione sono stati derivati dalle deformazioni orizzontali minime e massime definite nei modelli MEM 1D. È opportuno rilevare che i profili tensionali dello studio 1D (lungo i pozzi) sono calibrati rispetto all'analisi WBS. Generalmente, questi profili vengono confrontati con quelli ottenuti dall'inizializzazione degli sforzi 3D al fine di verificare possibili corrispondenze tra l'analisi dei singoli pozzi e il modellamento 3D e fornire una calibrazione locale per il modello tensionale 3D. A seconda dell'effetto delle caratteristiche strutturali, i profili 1D e 3D nelle posizioni dei pozzi possono essere differenti. Generalmente, si osserva una buona corrispondenza tra le previsioni 1D e 3D per i pozzi distanti dalle faglie principali e in aree caratterizzate da orizzonti quasi sub-orizzontali. In effetti, queste sono le condizioni che meglio rispecchiano le ipotesi teoriche adottate per il modellamento geomeccanico 1D dei singoli pozzi (**Sezione 2.4.2.4**).

La calibrazione degli sforzi 3D è eseguita variando in maniera iterativa le condizioni al contorno applicate fino a quando non si osserva una corrispondenza soddisfacente nelle posizioni dei pozzi specificati. Poiché sono piuttosto distanti dalle faglie principali, entrambi i pozzi costituiscono un buon riferimento per la calibrazione.

La **Figura 31** mostra il confronto tra gli sforzi principali del modellamento geomeccanico 3D e del modello MEM 1D nel pozzo A01. Si osserva una buona corrispondenza tra gli sforzi del modello 1D e quelli del modello 3D. Ciò consente di prendere in considerazione i risultati dell'inizializzazione degli sforzi rappresentativi dello stato tensionale locale prima delle operazioni di stoccaggio (UGS). La **Figura 32** mostra un esempio dei risultati del modellamento 3D degli sforzi in termini di distribuzione spaziale dello sforzo orizzontale totale minimo al centro della zona C1 del giacimento. Come osservabile, il campo tensionale varia avvicinandosi ai piani di faglia.

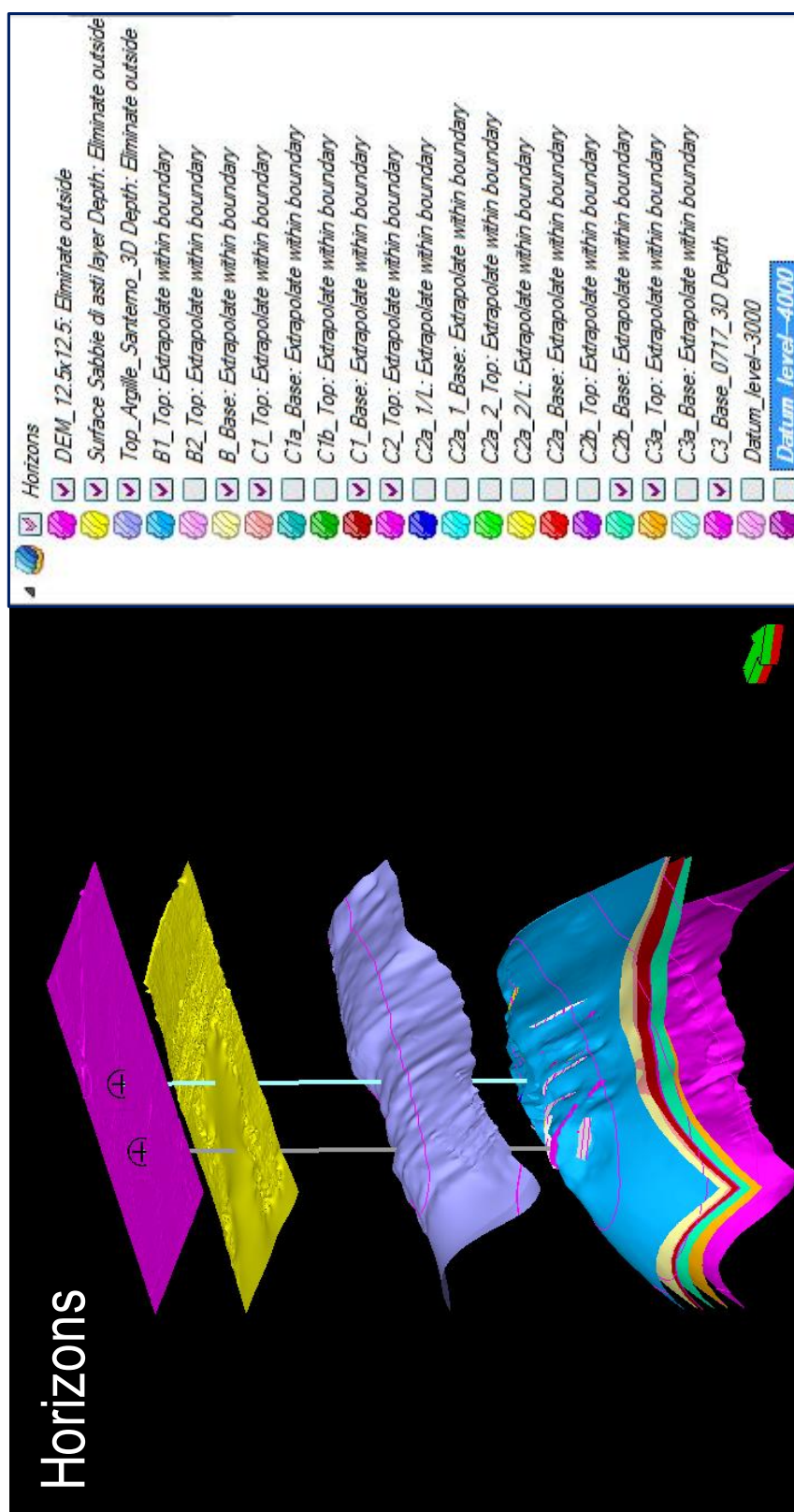
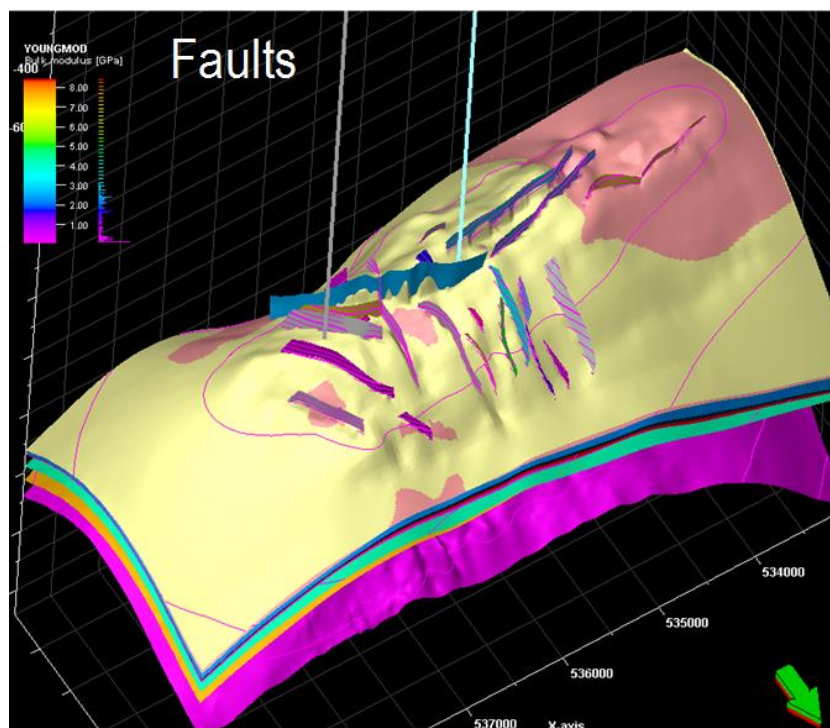
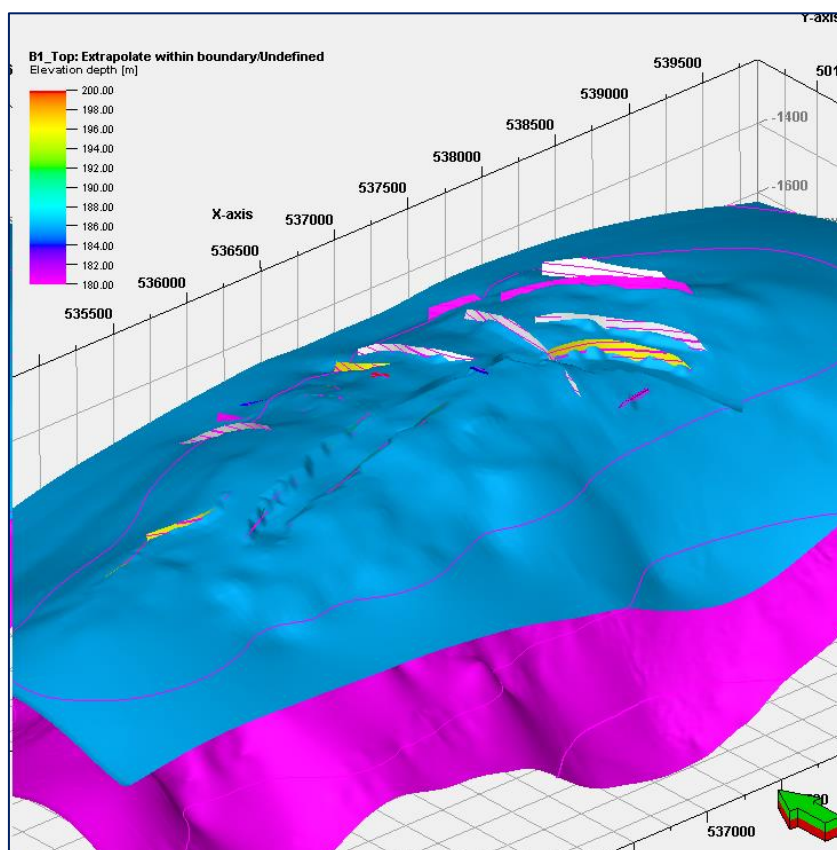


Figura 19. Orizzonti inclusi nel modello strutturale (a destra) e orizzonti principali da elenco attivo (a sinistra).



(a)



(b)

Figura 20. (a) Faglie incluse nel modello strutturale e (b) faglie che intersecano B1_Top e penetrano nella formazione Argille del Santerno (roccia di copertura).

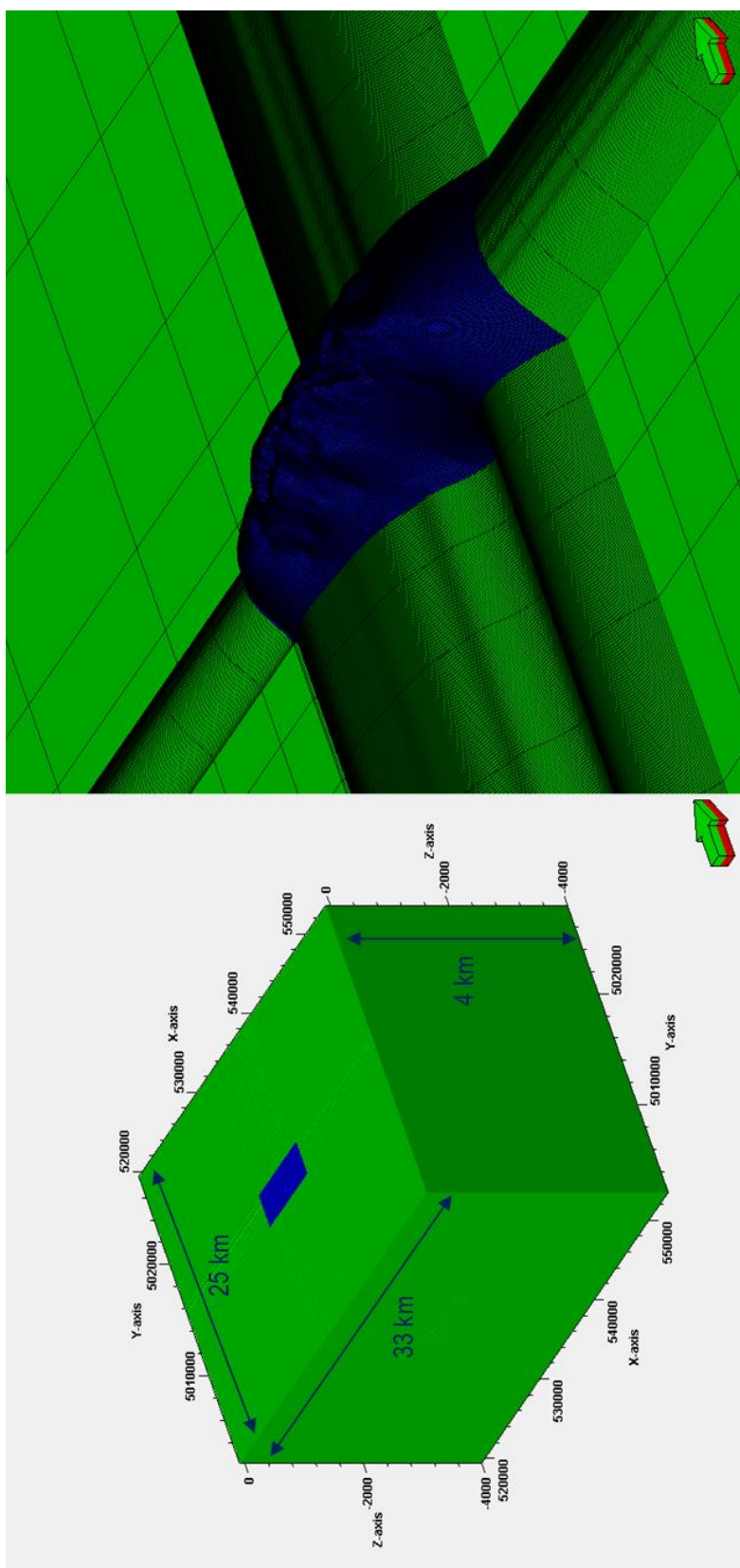


Figura 21. Il modello geomeccanico 3D del giacimento Cornegliano dopo l'integrazione finale.

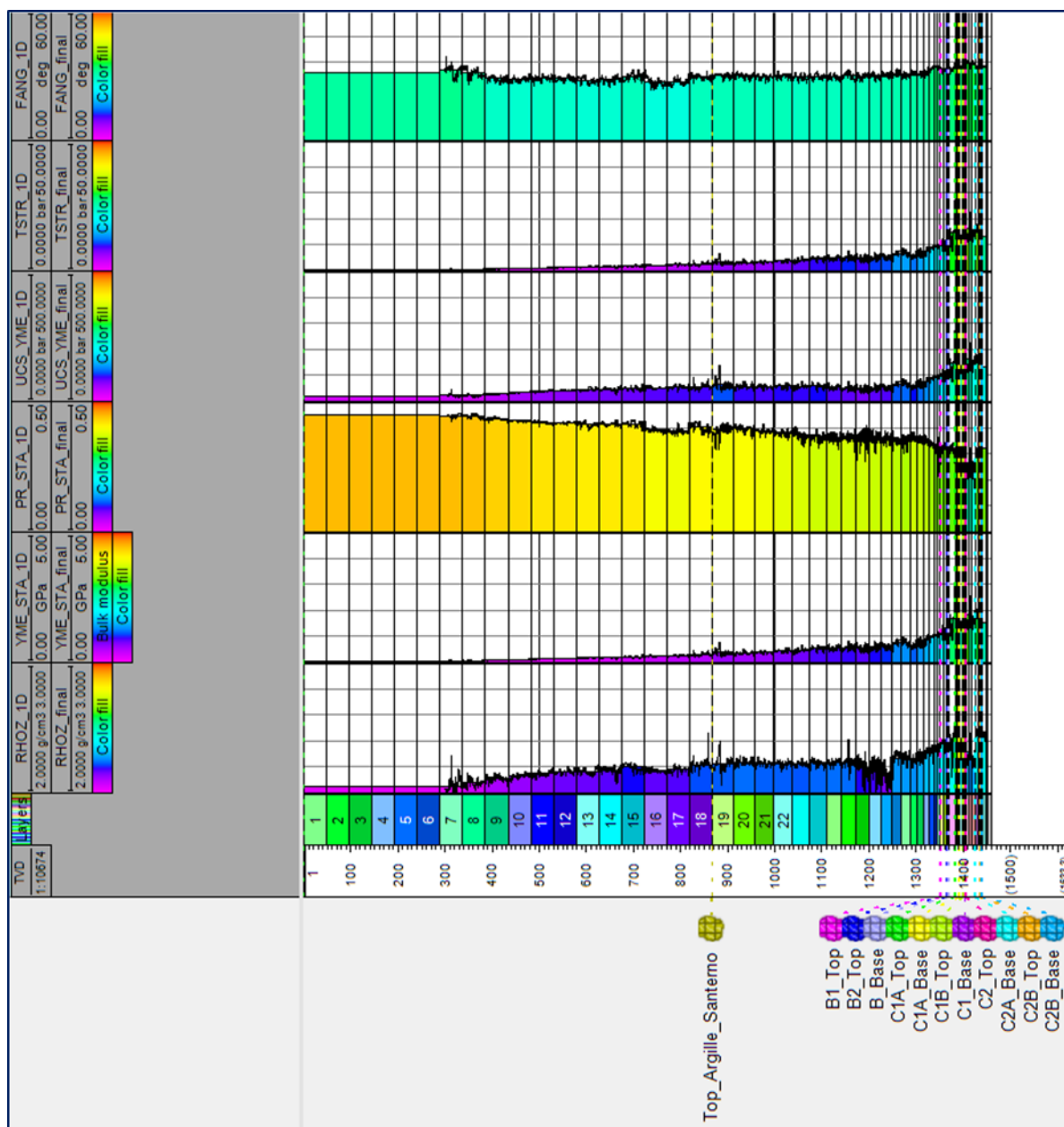


Figura 22. Confronto tra i profili MEM 1D (curve nere) e le proprietà meccaniche scalate (aree colorate) lungo il pozzo A01.

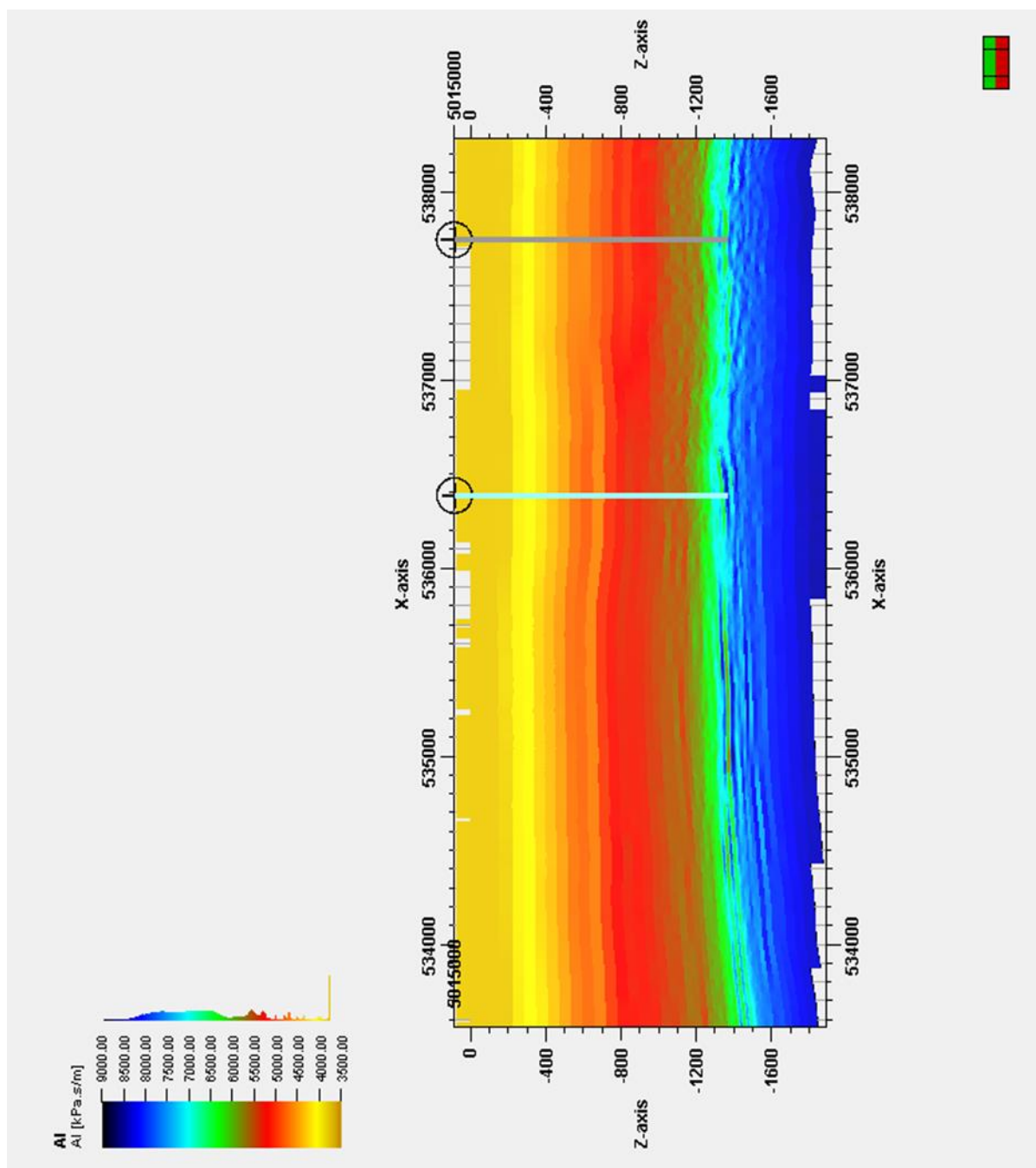


Figura 23. Impedenza acustica (AI) lungo la sezione E-O passante attraverso i pozzi A01 e B01.

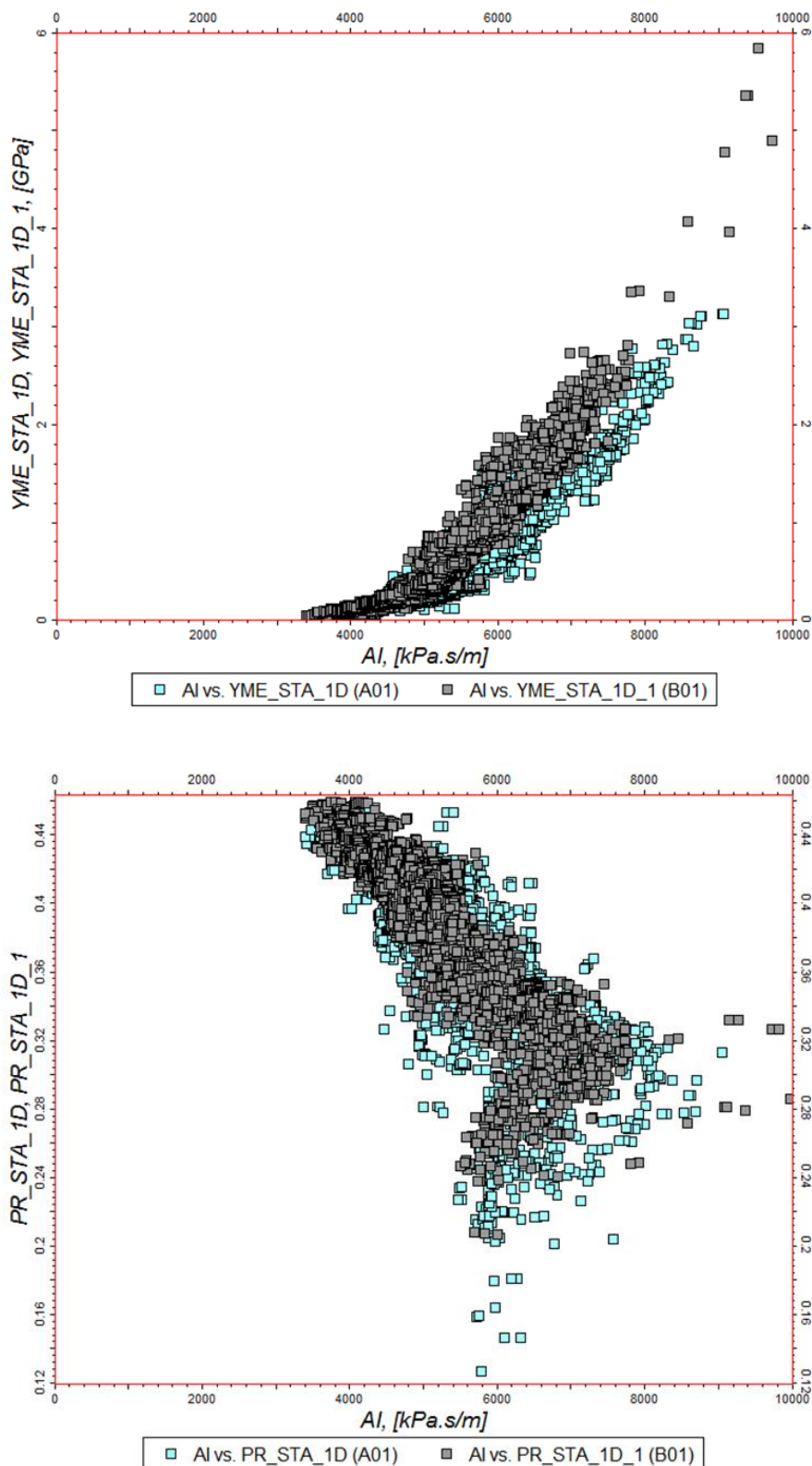


Figura 24. Correlazione tra AI e il modulo statico di Young calcolato (in alto) e il rapporto di Poisson (in basso) lungo i pozzi A01 e B01.

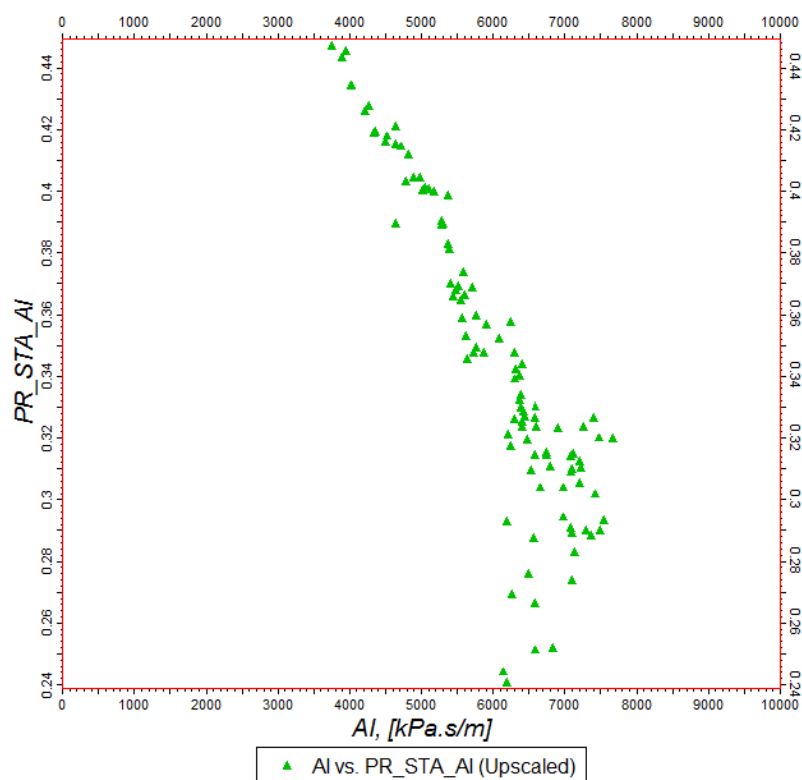
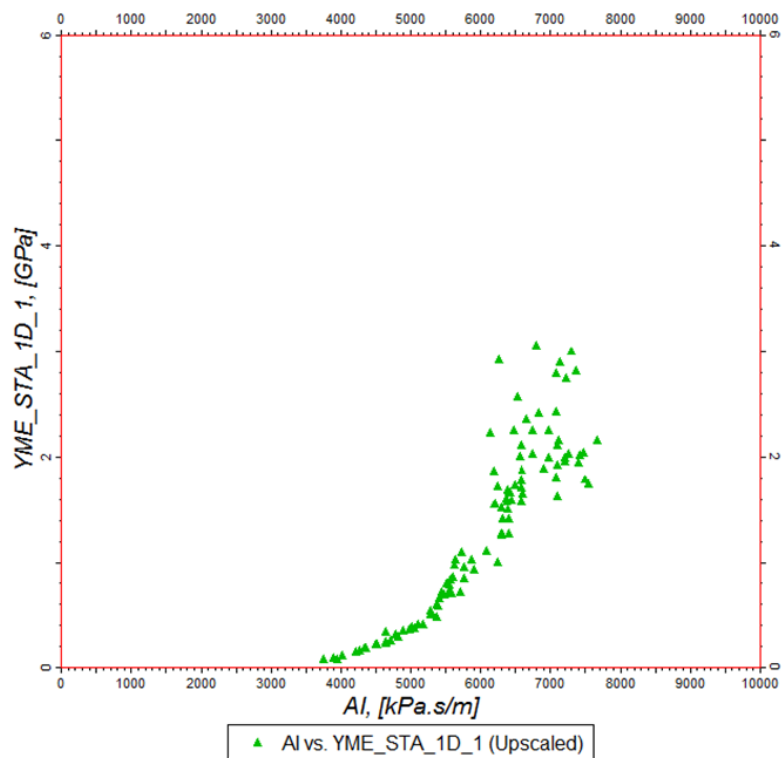


Figura 25. Modulo di Young statico 3D e rapporto di Poisson scalati utilizzando la tendenza AI come input secondario.

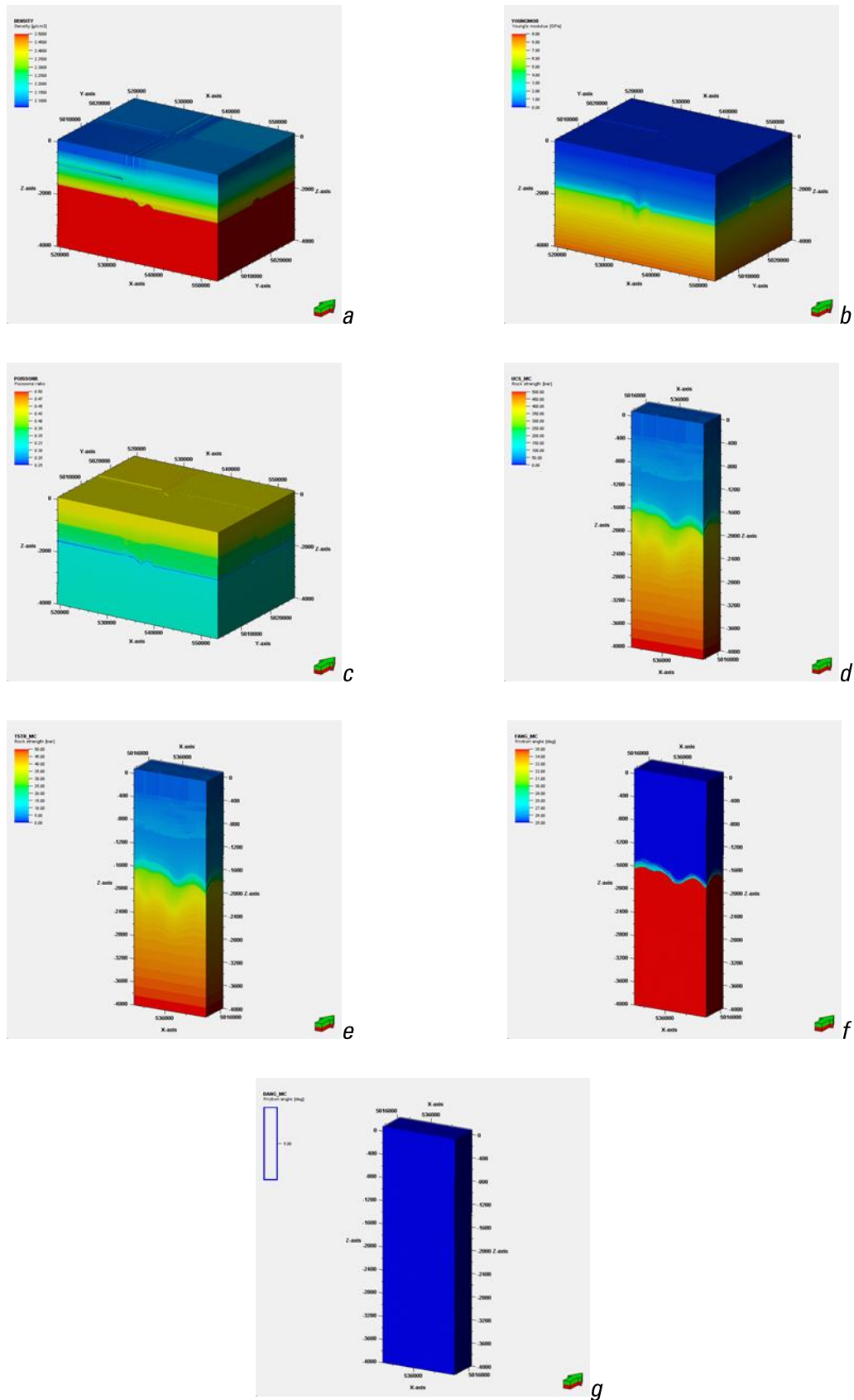


Figura 26. Le proprietà geomeccaniche 3D: (a) densità (b) modulo di Young (c) rapporto di Poisson, (d) UCS, (e) resistenza a trazione, (f) angoli di attrito, (g) angolo di dilatanza

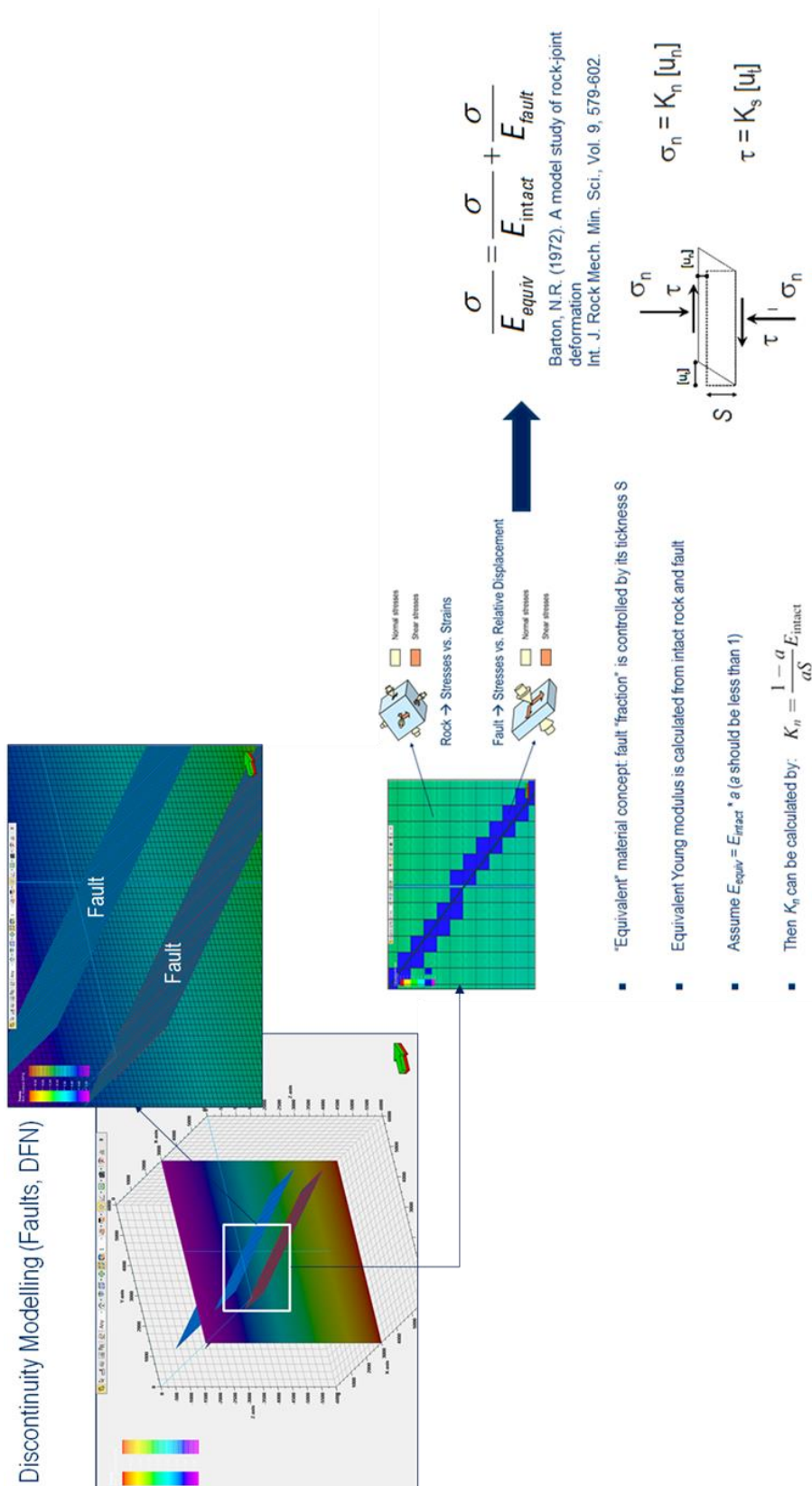


Figura 27. Modellamento delle discontinuità

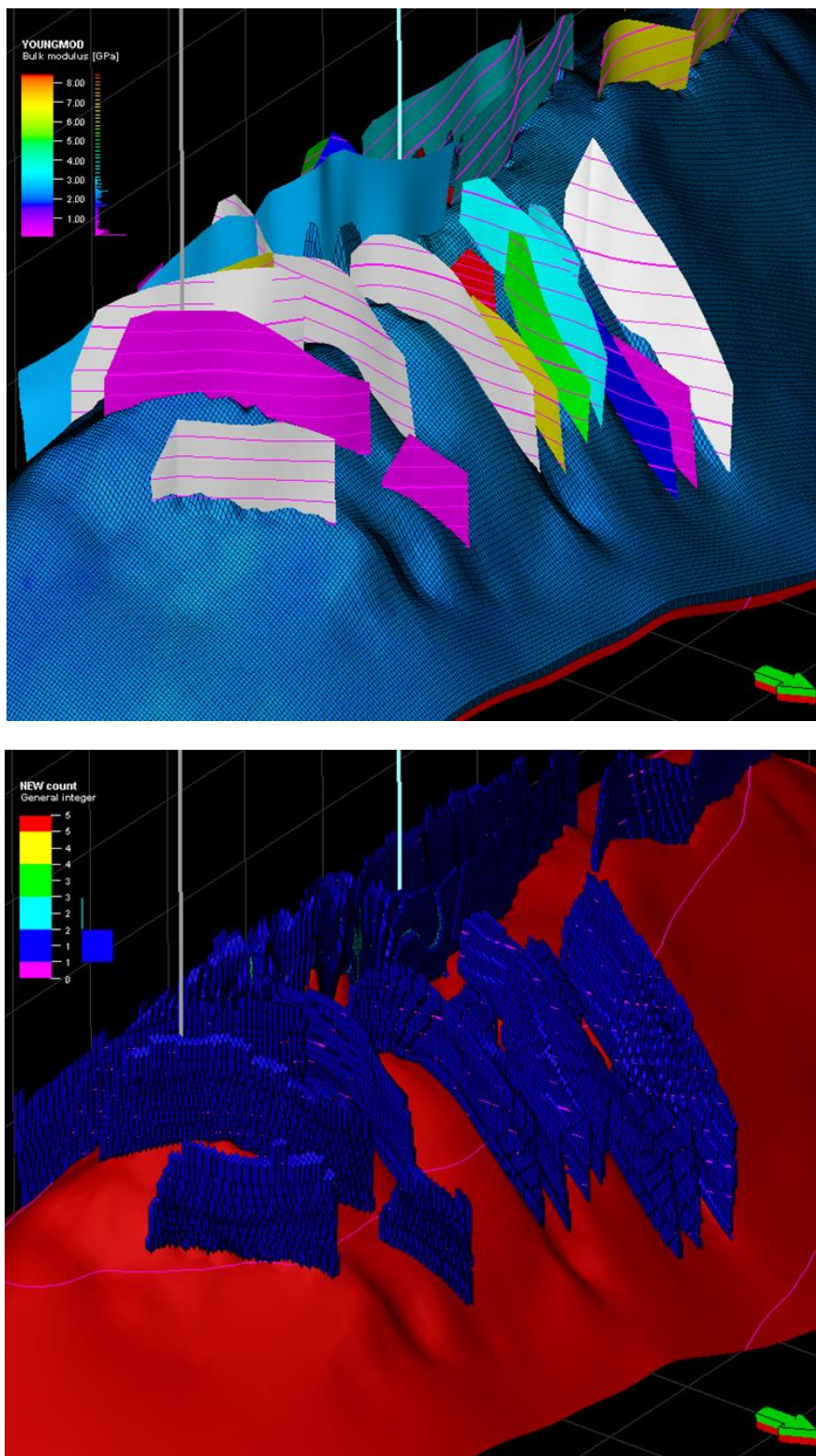


Figura 28. Piani di faglia disponibili (in alto) ed elementi faglia corrispondenti (in basso). È inoltre visibile l'elevata risoluzione orizzontale della mesh (15 m x 15 m).

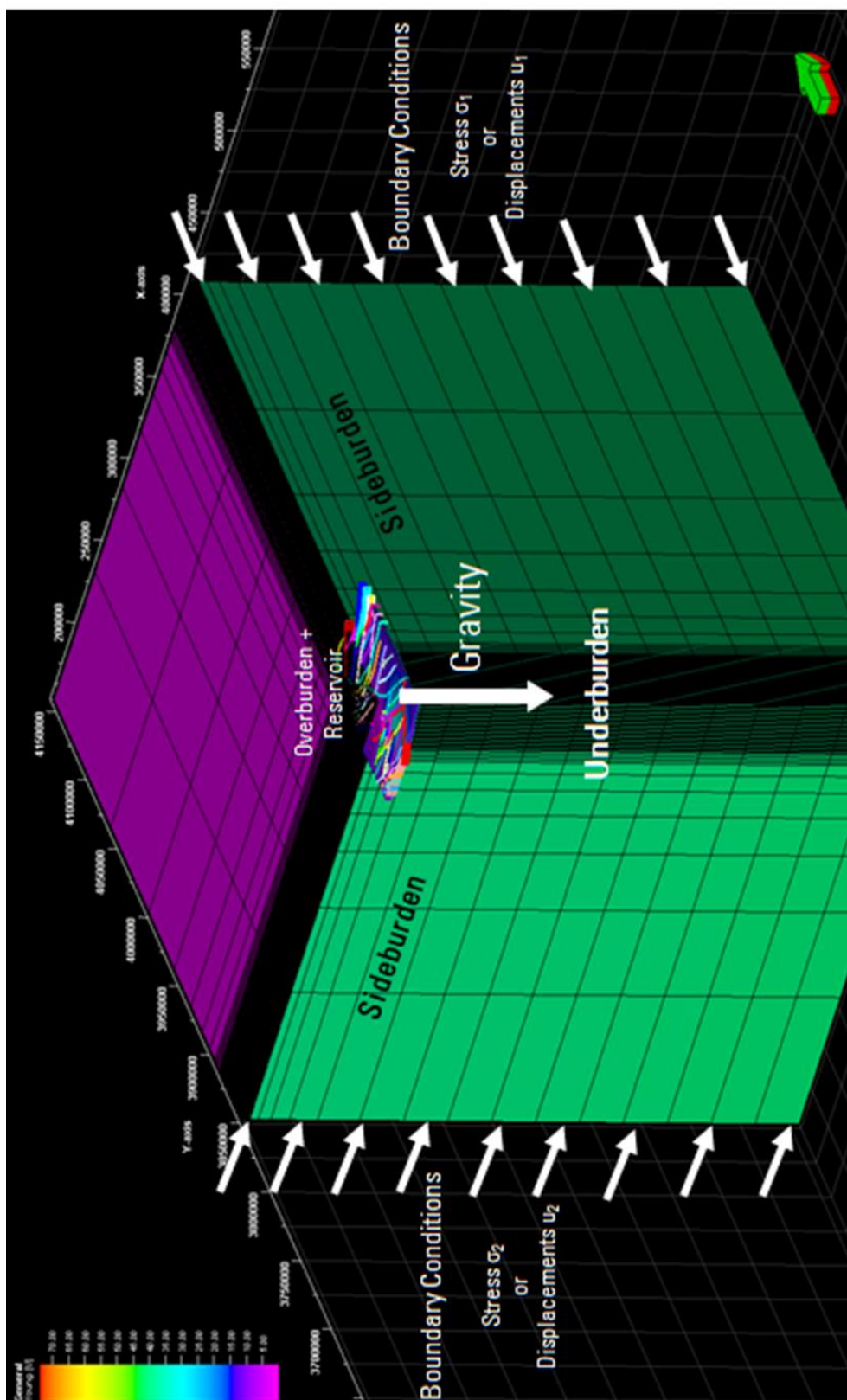


Figura 29. Schema di inizializzazione degli sforzi 3D (reticolo non relativo al modello del campo Cornegliano).

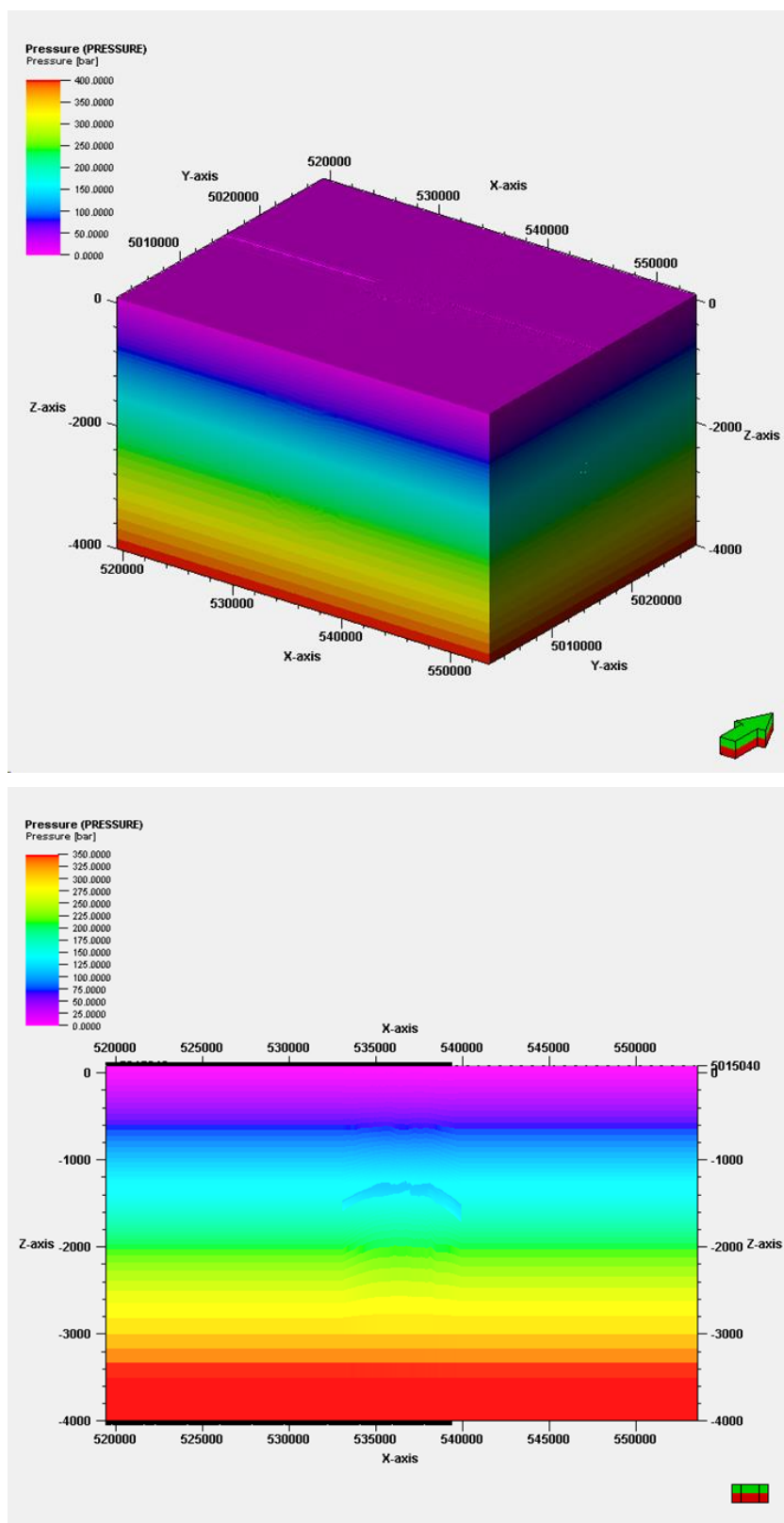


Figura 30. Esempio di cubo di pressione interstiziale (in alto) utilizzato per il modellamento 3D degli sforzi. La figura nella parte inferiore mostra una sezione passante attraverso il giacimento (anno 2018).

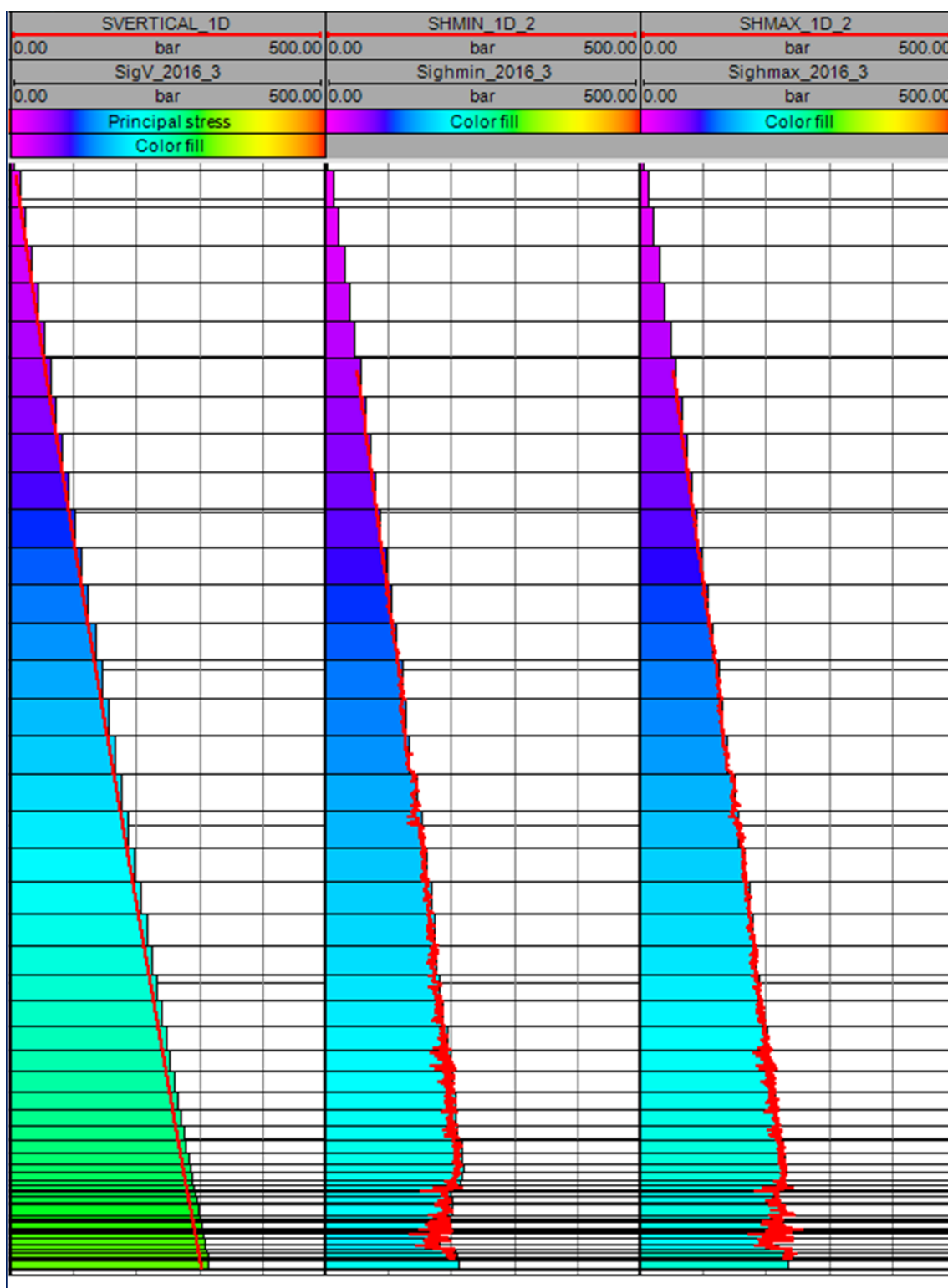


Figura 31. Confronto tra i principali sforzi 3D (colorati) e gli sforzi 1D del modello MEM (neri) per il pozzo A01 (a destra).

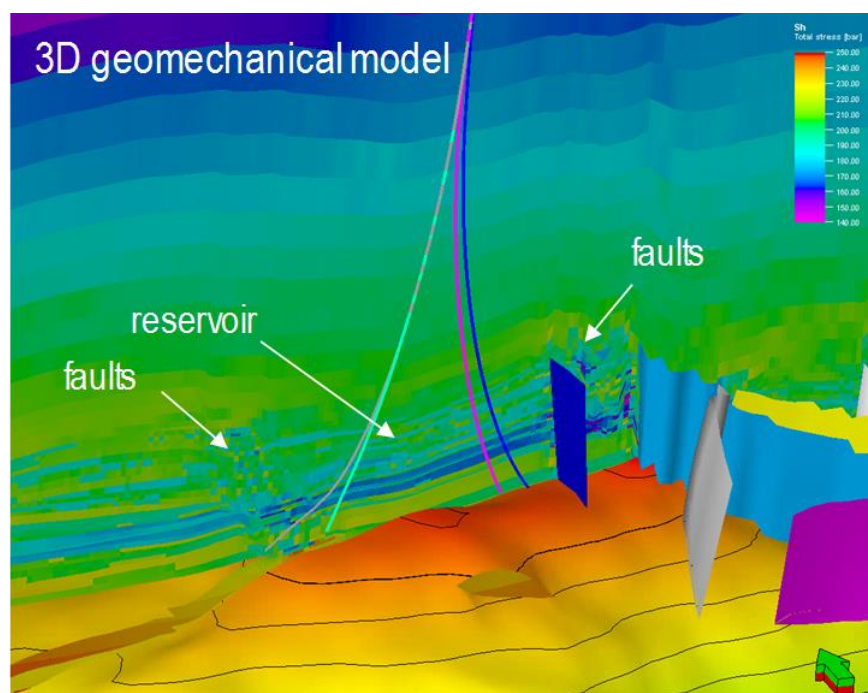
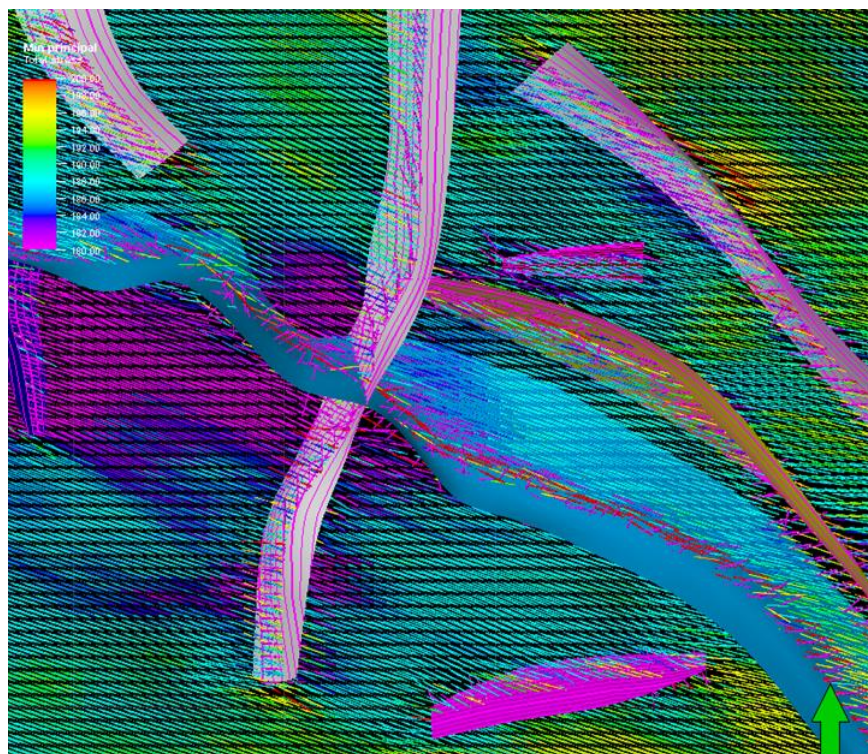


Figura 32. In alto: Variazione dell'azimut e dell'entità dello sforzo orizzontale minimo in prossimità delle faglie nella zona centrale C1 del giacimento. Nota: l'orientamento dello sforzo orizzontale minimo distante dalle faglie è 110° N, in accordo alla direzione imposta sui confini del modello. In basso: sezione verticale che mostra la distribuzione degli sforzi orizzontali minimi. Si notino le variazioni in prossimità delle faglie.

2.5.6 *Risultati del modellamento degli sforzi durante le operazioni di stoccaggio (UGS): analisi accoppiata del giacimento.*

Per quanto riguarda le operazioni di stoccaggio (UGS), l'utilizzo più importante dei risultati del modello geomeccanico 3D consiste nel considerare le variazioni delle pressioni ottenute dalle simulazioni dinamiche del giacimento al fine di prevedere le variazioni degli sforzi e possibili instabilità all'interno del giacimento e nelle zone a esso circostanti. Inoltre, è possibile valutare la deformazione indotta durante i cicli di iniezione/produzione ed è possibile quantificare il possibile impatto sul piano campagna (subsidenza o sollevamento).

In particolare, i risultati dell'analisi 3D sono stati utilizzati per ottenere informazioni utili sull'integrità del giacimento, nello specifico:

- Deformazione del giacimento durante i cicli di iniezione/produzione (ovvero sollevamento e compattazione), causa di sollevamento e subsidenza del piano campagna.
- Analisi dell'integrità della roccia di copertura (cap rock).
- Analisi della stabilità delle faglie.

I risultati presentati nei paragrafi successivi fanno riferimento ad un utilizzo teorico e intensivo del giacimento: tutti i cicli di iniezione/produzione prevedono l'uso dell'intero volume disponibile (WG massimo) e delle massime portate. L'analisi si estende fino al 2043 (52 regimi di pressione) considerando uno schema di tipo one-way coupling tra il simulatore geomeccanico e quello del giacimento (**Figura 33**). In questo schema, le pressioni calcolate dal simulatore del giacimento (ECLIPSE) sono passate al simulatore geomeccanico (VISAGE) che ricalcola le variazioni degli sforzi e le deformazioni delle formazioni rocciose e faglie all'interno del giacimento e nell'area circostante, valutando eventuali criticità (rotture ingestibili) per ogni stato tensionale associato alle variazioni di pressione.

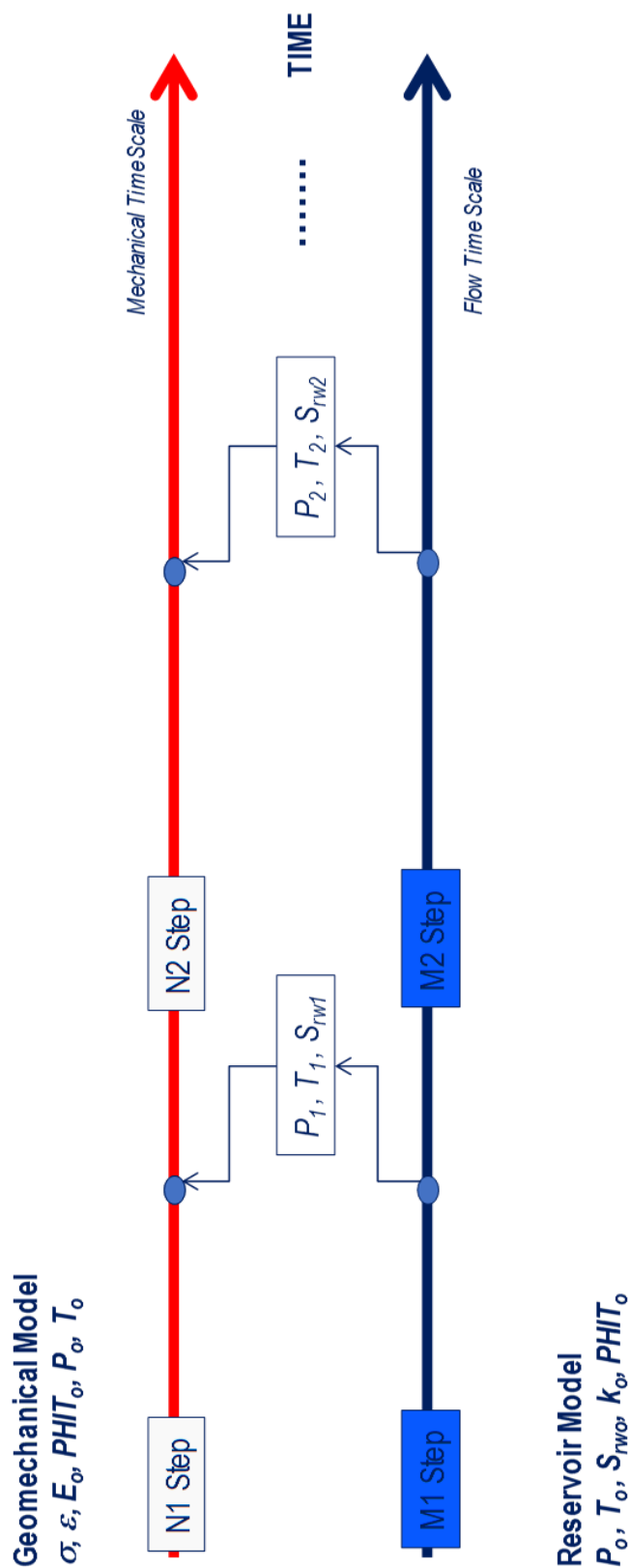


Figura 33. Simulazione con accoppiamento di tipo "one-way" tra il modello dinamico e il modello geomeccanico del giacimento.

2.5.6.1 Deformazione del giacimento durante i cicli di iniezione/produzione

Durante le operazioni di stoccaggio (UGS), la fase di iniezione determina l'aumento della pressione e la diminuzione dello sforzo effettivo all'interno del giacimento. Viceversa, durante le fasi di produzione, lo sforzo effettivo aumenta in conseguenza della diminuzione della pressione. Al fine di bilanciare le variazioni all'interno del giacimento, il comportamento all'interno della roccia di copertura (overburden) e della base (underburden) sarà opposto. Pertanto, l'iniezione causa un aumento dello sforzo effettivo nella roccia di copertura (cap rock), mentre la produzione tende a fare diminuire lo sforzo effettivo all'interno della roccia di copertura.

L'analisi geomeccanica 3D consente di indagare, in tutti i punti del giacimento e delle coperture, l'evoluzione delle componenti degli sforzi effettivi e, potenzialmente, di determinare se queste variazioni abbiano prodotto rotture (ovvero deformazioni plastiche "irrecuperabili"). L'analisi può essere eseguita considerando le due invarianti di tensione p' (tensione media effettiva) e q (tensione deviatorica) espresse in termini di sforzi effettivi principali. Ovvero:

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad (17)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2)} \quad (18)$$

L'evoluzione di p' e di q fornisce il "percorso di carico" del volume di roccia corrispondente. Se il percorso "tocca" il criterio di rottura, si verifica una deformazione plastica irreversibile. Si ricorda che, nel presente studio, per la roccia e per l'overburden del giacimento è stato preso in considerazione il criterio di rottura di Mohr-Coulomb (**Tabella 5**).

Il giacimento del campo Cornegliano è caratterizzato da un leggero sovraconsolidamento [10]. Per la porosità reale, il suo stato tensionale attuale in termini di tensione media effettiva p' è minore della tensione media effettiva massima registrata durante l'interramento. La porosità puntuale corrispondente, espressa in funzione di p' , giace sul ramo scarico-carico della curva di consolidamento normale (punto rosso **Figura 34a**).

Durante la produzione, lo svuotamento indotto causa un aumento di p' che determina una riduzione della porosità e il compattamento (elastico) del giacimento. Se l'aumento p' è tale da toccare la zona di rottura in **Figura 34b**, si verifica uno snervamento plastico volumetrico che causa un collasso irreversibile degli interstizi (freccia blu). Non si prevede il verificarsi di questa situazione nel giacimento poiché la pressione non sarà mai inferiore alla pressione minima registrata nello stato di massima produzione (50 bar).

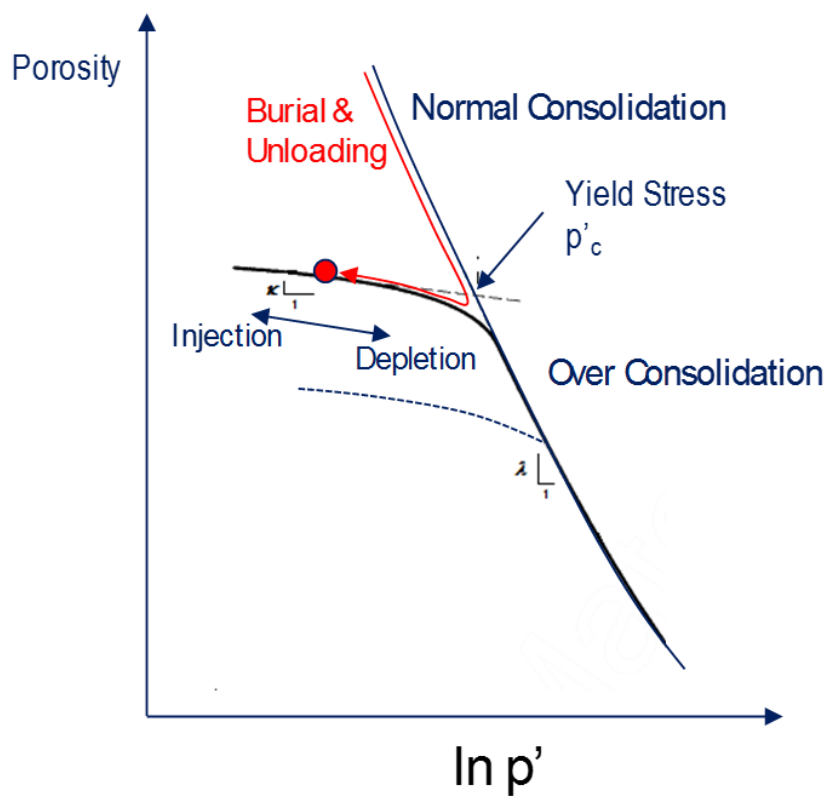
Durante l'iniezione, la ripressurizzazione causa la diminuzione di p' e l'aumento della porosità (sollevamento del giacimento) nel campo elastico (**Figura 34a**). Se p' diminuisce in maniera significativa, il percorso di carico in **Figura 34b** col tempo toccherà il criterio di rottura a taglio provocando una deformazione plastica irreversibile.

Per il giacimento, non si prevedono rotture volumetriche di grande entità poiché le operazioni di stoccaggio (UGS) cambieranno la pressione del giacimento dallo stato attuale (svuotato) a uno stato pressurizzato determinandone principalmente lo scarico (elastico). Per verificare questa affermazione, abbiamo indagato l'evoluzione degli sforzi durante i cicli di iniezione/produzione per il periodo gennaio 2018 - aprile 2043.

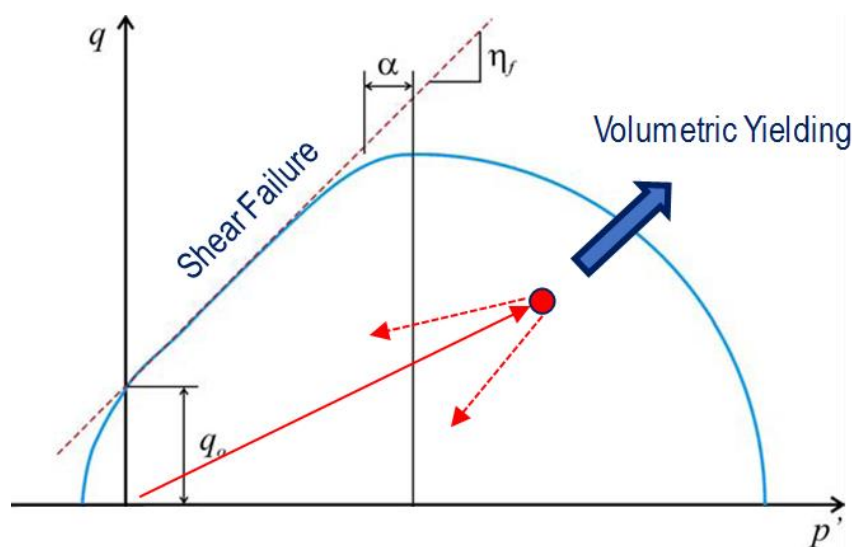
La **Figura 35** mostra l'evoluzione della pressione del giacimento a metà delle zone C1 nello stato iniziale svuotato (gennaio 2018), per l'ultima iniezione simulata (ottobre 2042) e per l'ultima produzione simulata (aprile 2043). Il campo di pressione è eterogeneo e l'evoluzione dei cicli di pressione in ogni zona è piuttosto diversa (**Figura 36**).

Nella **Figura 37** fino alla **Figura 40** sono mostrati la contemporanea evoluzione della pressione del giacimento, lo sforzo orizzontale minimo effettivo e lo spostamento verticale per 4 punti differenti sulla sommità del giacimento. Come osservabile, lo spostamento verticale evolve durante i cicli, aumentando durante l'iniezione (sollevamento del giacimento) e diminuendo durante la produzione (compattazione del giacimento). Nei punti caratterizzati da una pressione maggiore (160 bar) si osserva un sollevamento massimo di circa 21 cm. La compactazione maggiore (10 cm) è osservata nella zona più svuotata (punto D) in cui la pressione finale del giacimento è di circa 75 bar. L'esame dei percorsi di carico in **Figura 41** mostra che i 4 punti nella parte superiore del giacimento restano tutti al di sotto della zona di rottura Mohr-Coulomb (linea rossa), nel campo elastico.

Un'indagine estesa dei risultati dell'analisi numerica conferma che la deformazione del giacimento durante i cicli di iniezione/produzione si verifica all'interno del campo elastico senza innesco di condizioni di rottura.

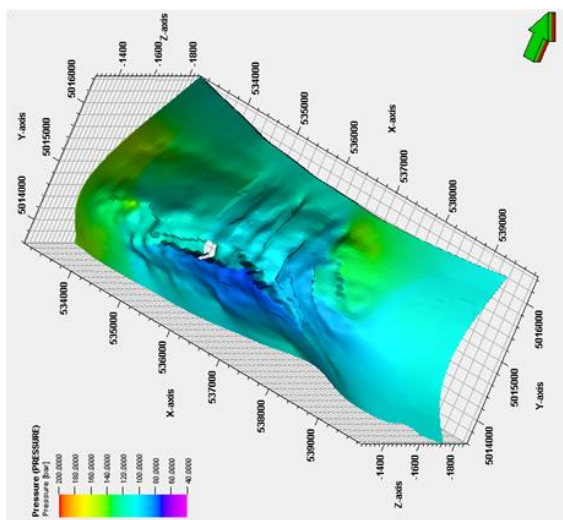


(a)

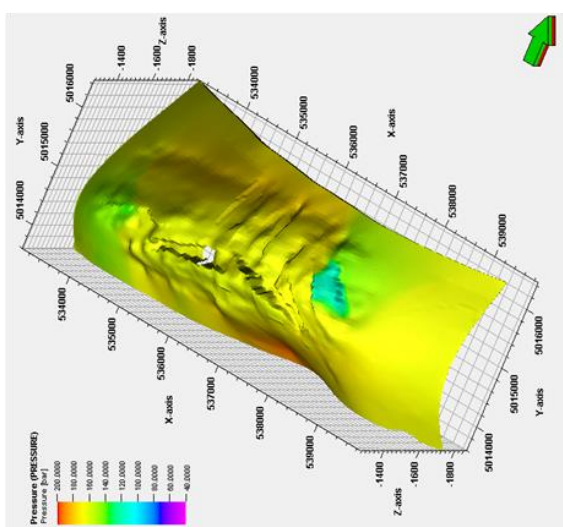


(b)

Figura 34. Evoluzione teorica dello stato tensionale all'interno del giacimento durante l'iniezione/la produzione.

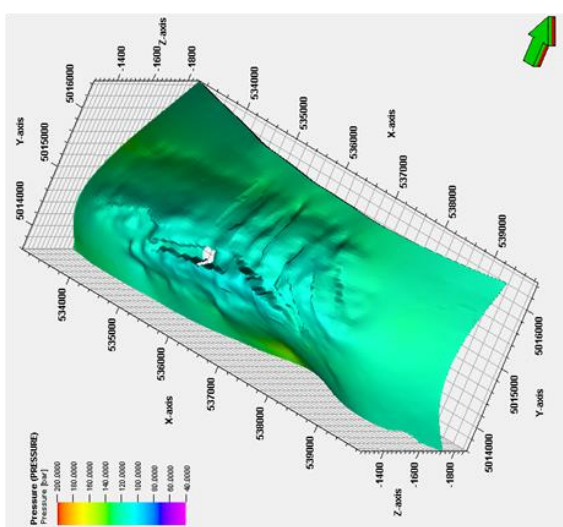


April 2043
(Depletion)



October 2042
(Injection)

view refers to mid C1



January 2018

Figura 35. Variazioni della pressione durante i cicli di iniezione/produzione.

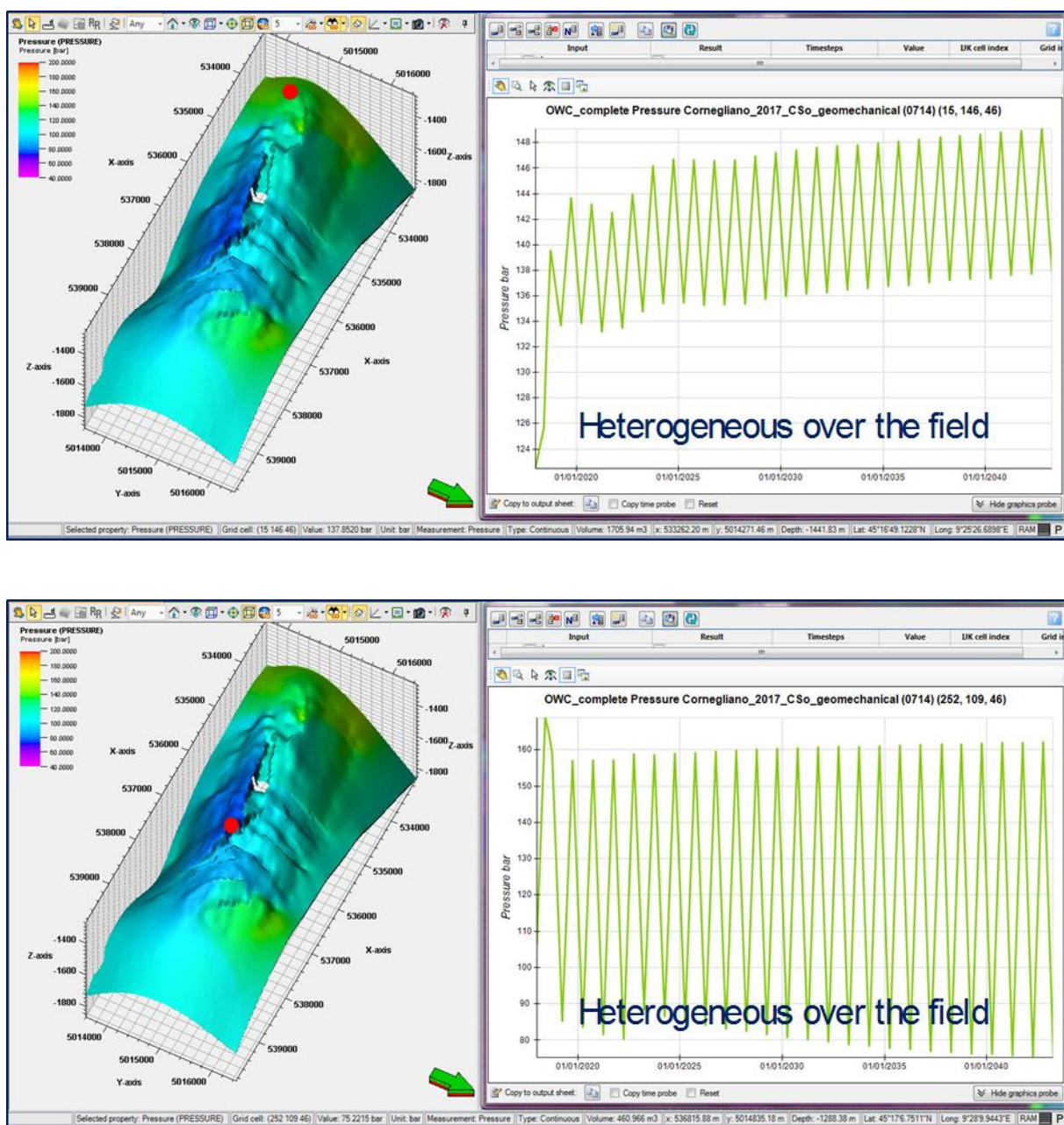


Figura 36. Variazioni della pressione durante i cicli di iniezione/produzione in due zone differenti del giacimento.

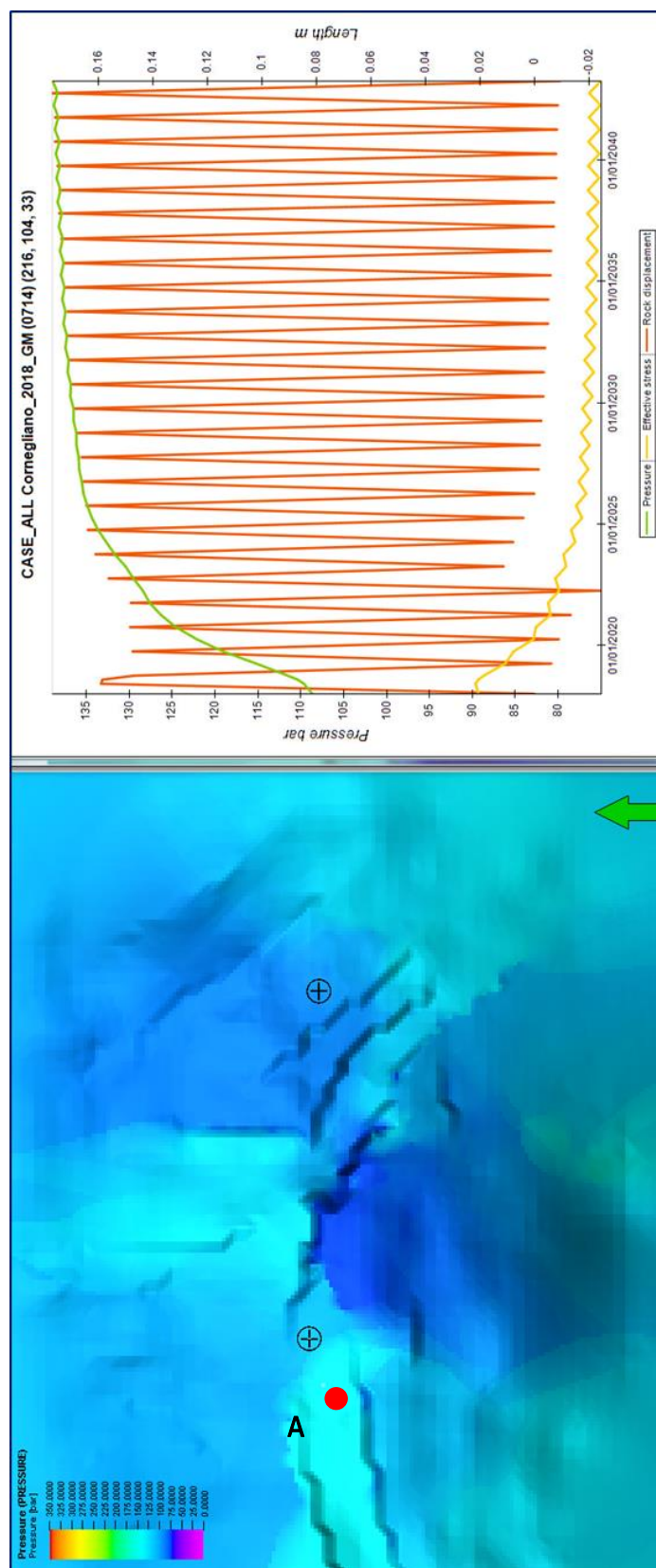


Figura 37. Evoluzione della pressione, dello sforzo orizzontale minimo effettivo e dello spostamento verticale su B1_Top di 4 punti differenti (punto A).

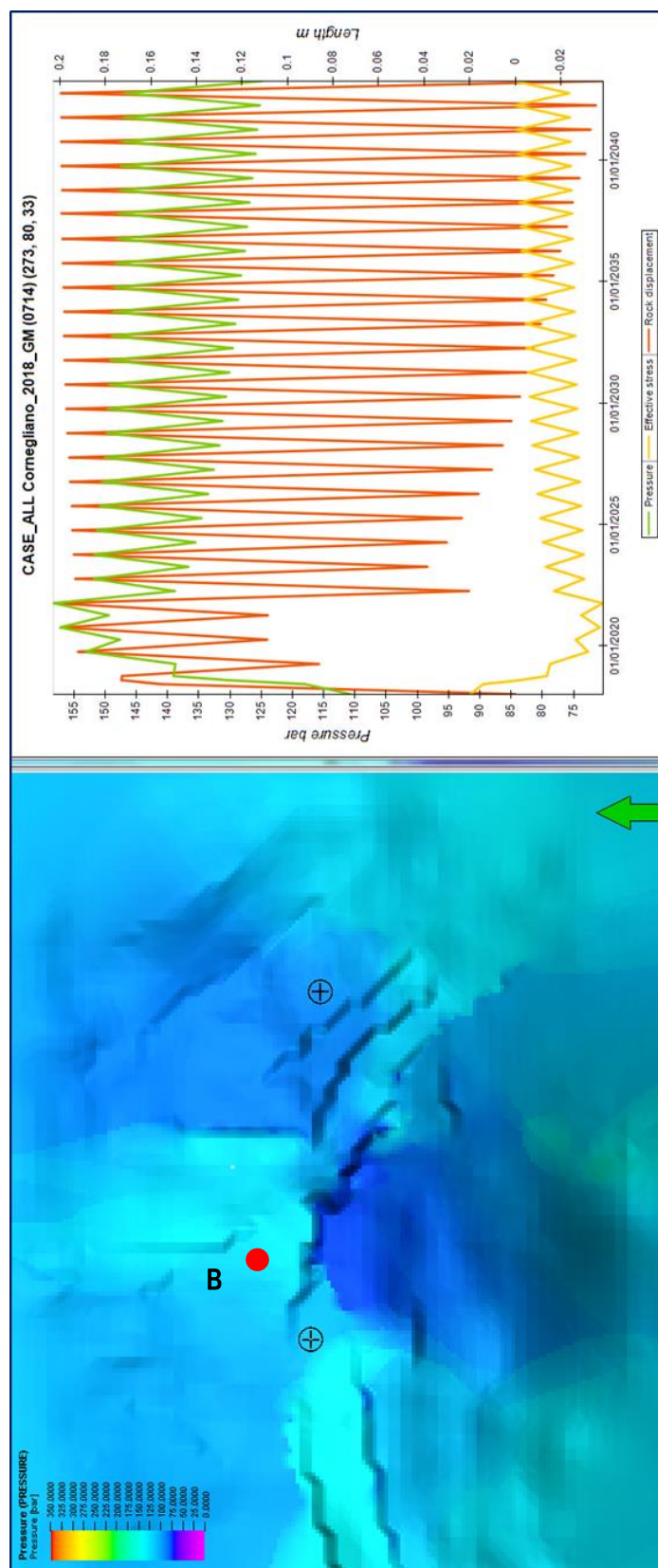


Figura 38. Evoluzione della pressione, dello sforzo orizzontale minimo effettivo e dello spostamento verticale su B1_Top di 4 punti differenti (punto B).

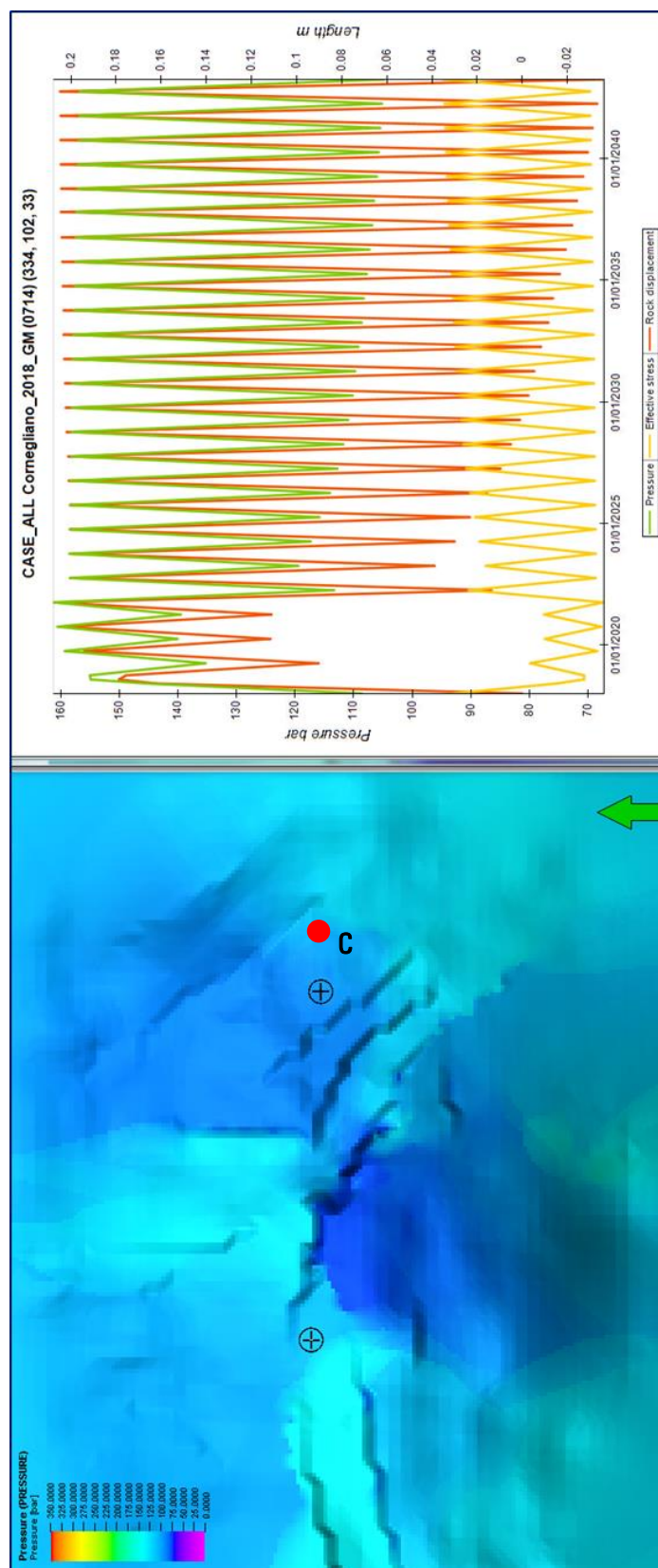


Figura 39. Evoluzione della pressione, dello sforzo orizzontale minimo effettivo e dello spostamento verticale su B1_Top di 4 punti differenti (punto C).

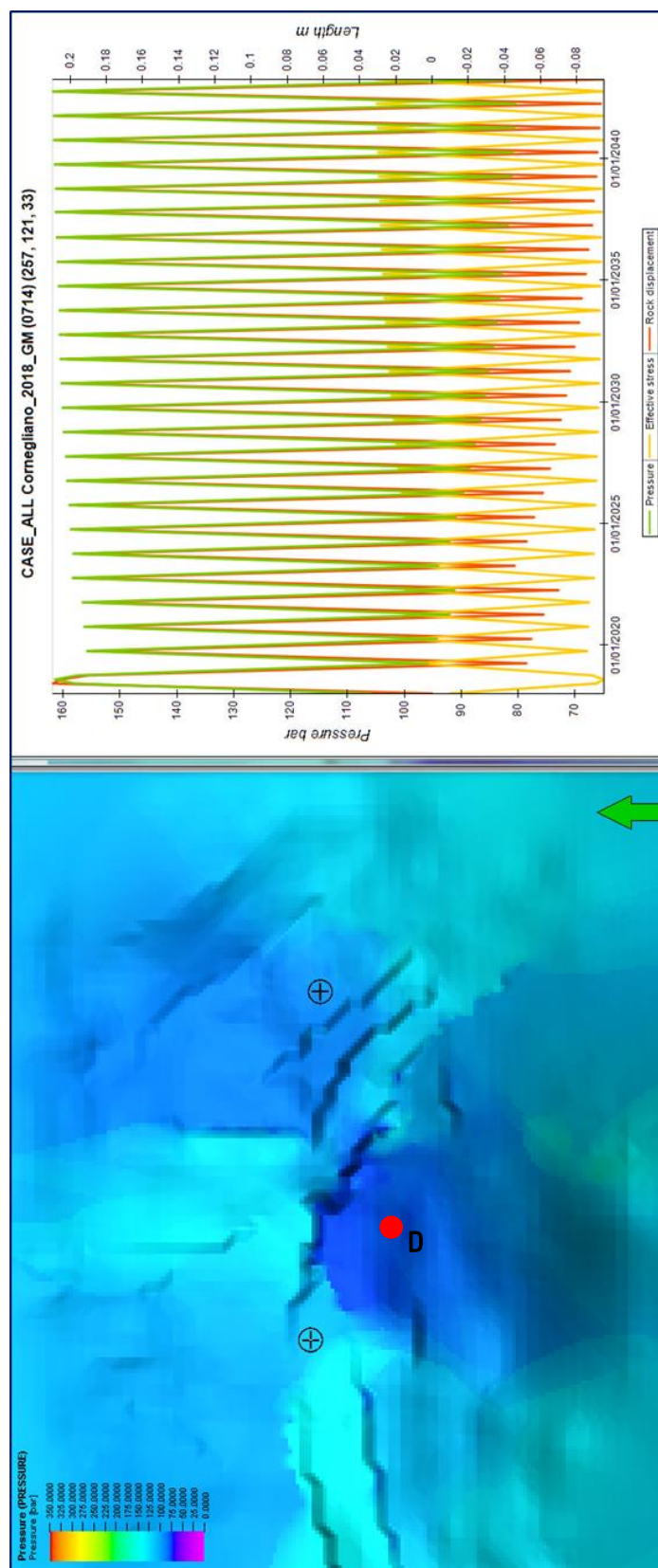
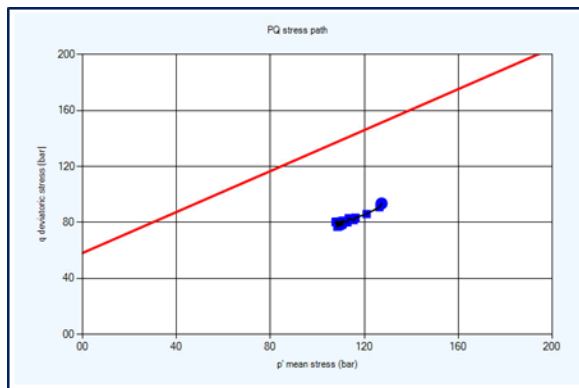
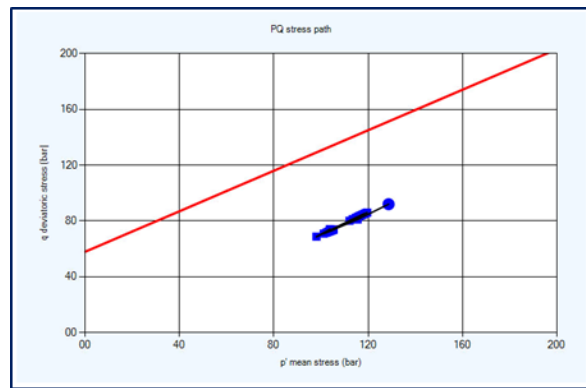


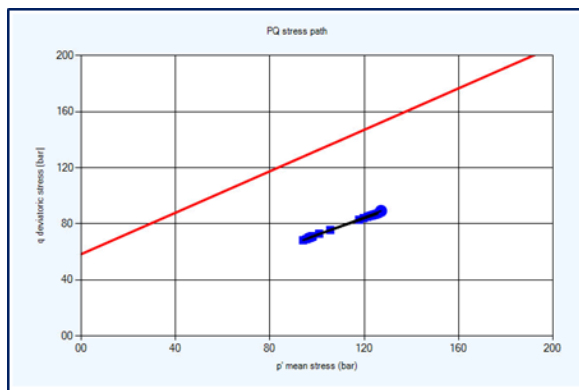
Figura 40. Evoluzione della pressione, dello sforzo orizzontale minimo effettivo e dello spostamento verticale su B1_Top di 4 punti differenti (punto D).



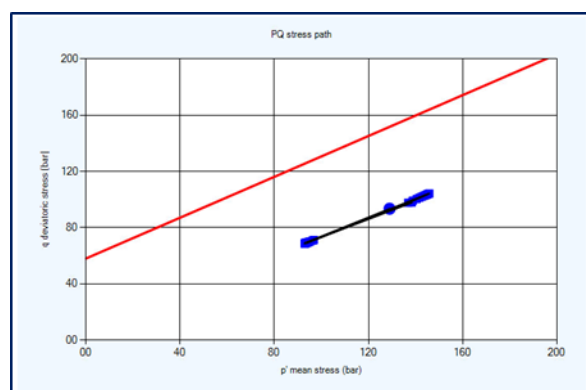
Punto A



Punto B



Punto C



Punto D

Figura 41. Percorsi di carico dei quattro punti alla sommità giacimento. Nota: tutti i punti restano al di sotto della zona di rottura Mohr-Coulomb (linea rossa) all'interno del campo elastico.

2.5.6.2 Analisi dell'integrità della roccia di copertura (cap rock)

Analogamente all'indagine condotta per l'analisi dell'integrità dell'osservatorio, l'analisi della roccia di copertura (cap rock) indica che, all'interno della roccia di copertura, non si innescano condizioni di rottura. La **Figura 42** mostra le variazioni degli sforzi in termini di sforzi di taglio alla sommità dell'anticlinale E-O al termine dell'iniezione nel 2042. Come osservabile, la maggior parte delle perturbazioni degli sforzi sono concentrate attorno alle faglie a causa della risposta e della mobilitazione dovuta allo stato di tensione applicato (la mobilitazione delle faglie rispetto alla stabilità e alla rottura è analizzata nel paragrafo successivo).

Alcune variazioni degli sforzi sono anche osservabili in posizioni distanti dalle faglie a causa delle variazioni di pressione del giacimento (lato ovest della sezione del giacimento in **Figura 42**). Nonostante queste variazioni, la deformazione plastica cumulativa alla sommità dell'orizzonte B1 nel 2042 sarà trascurabile, come mostrato dalla **Figura 43**. Come osservabile, al termine dei cicli di produzione non si osservano rotture rilevanti. Solo alcuni punti sembrano sviluppare deformazioni plastiche di taglio. La deformazione plastica generata è estremamente contenuta (minore di $1 \cdot 10^{-6}$).

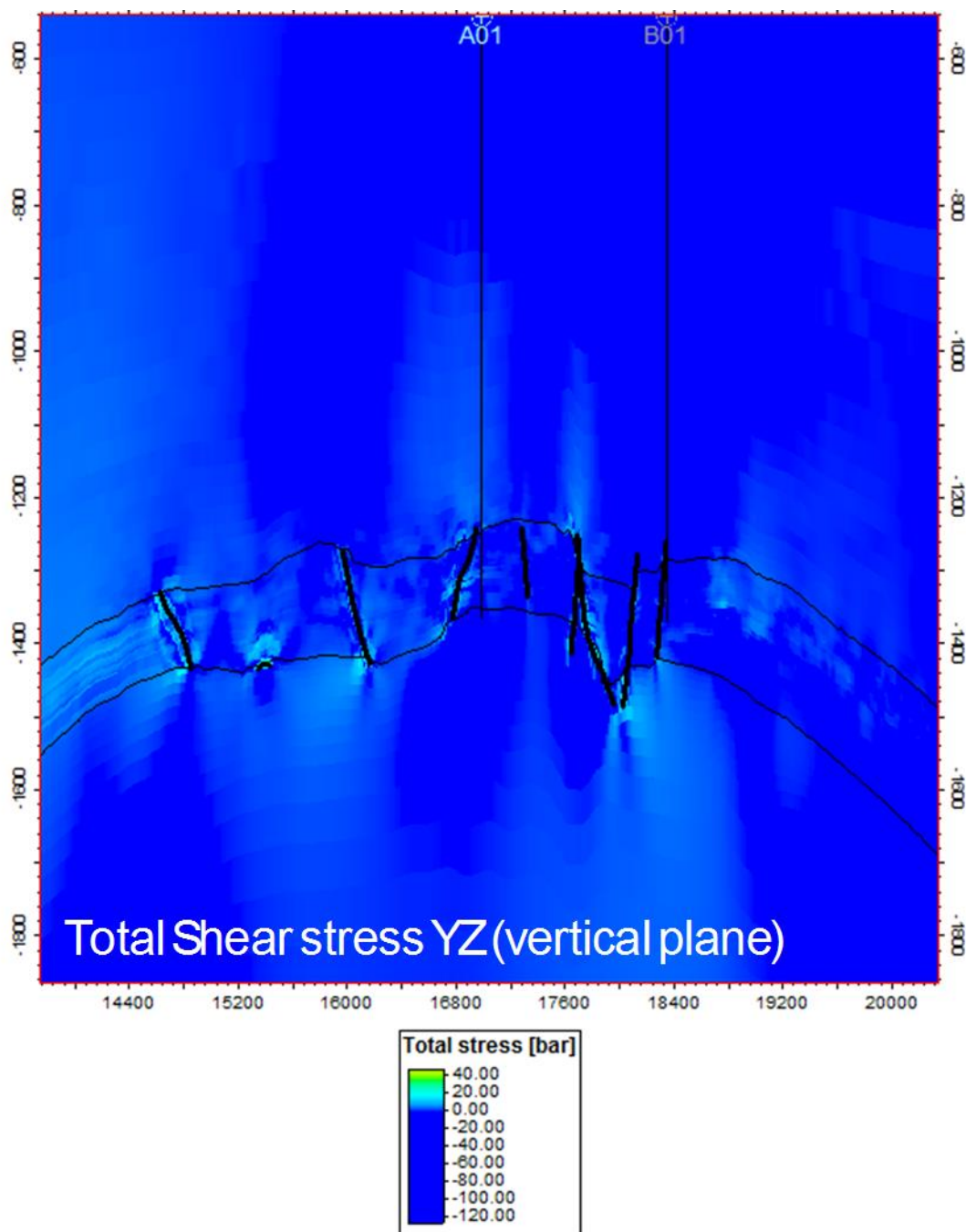


Figura 42. Variazioni degli sforzi di taglio lungo la sezione E-O passante attraverso le traiettorie dei pozzi A01 e B01.

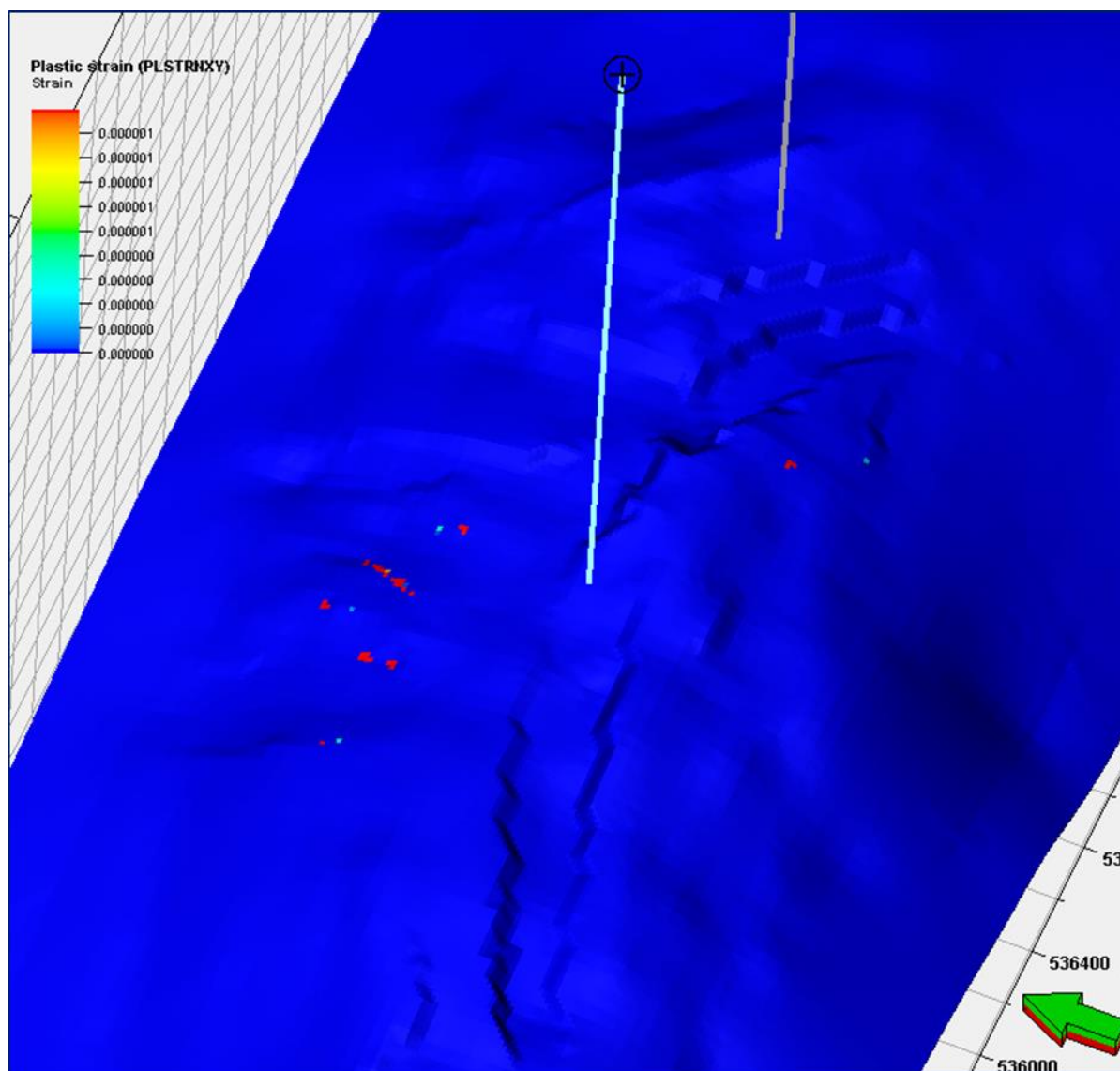


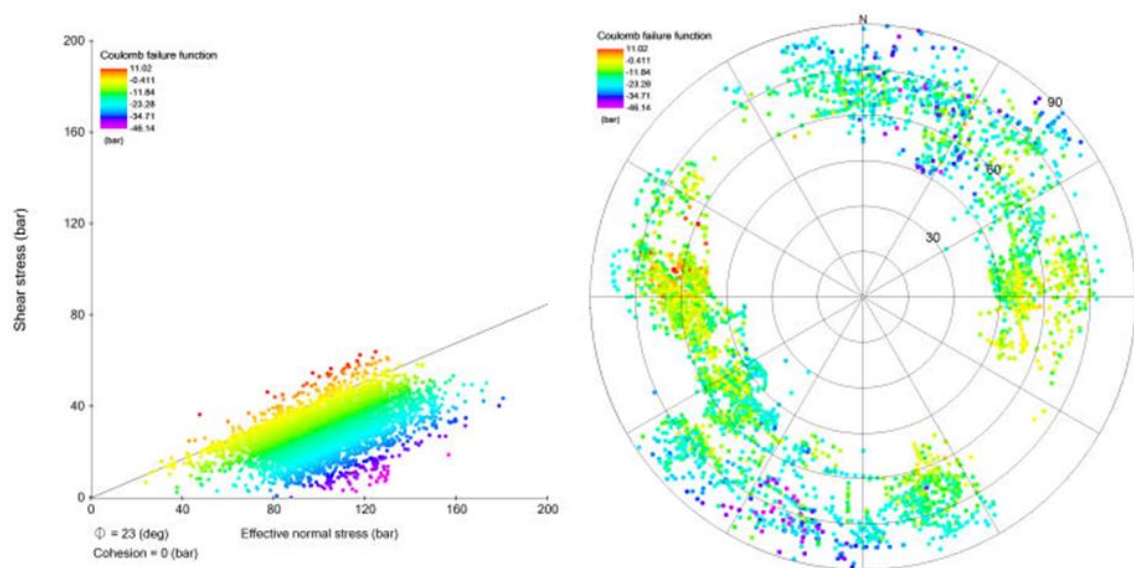
Figura 43. Deformazione plastica a taglio accumulata nello strato della roccia di copertura (cap rock) sopra B1_top dopo l'iniezione nel 2042. In tutta la roccia di copertura (cap rock) la rottura è trascurabile.

2.5.6.3 Analisi della stabilità delle faglie

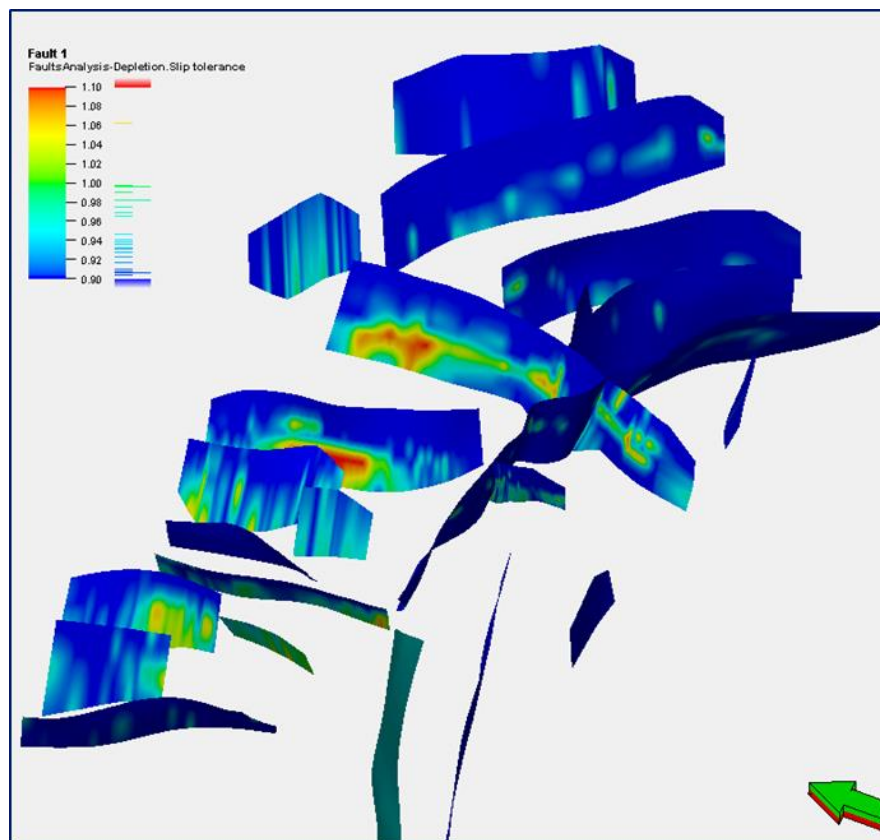
La **Figura 44a** mostra l'analisi della stabilità delle faglie utilizzando gli input dal modello 3D in termini di criterio di rottura di Mohr-Coulomb. L'analisi fa riferimento allo stato iniziale di fine produzione a gennaio 2018. Come indicato nella **Sezione 2.5.4**, è stato considerato un angolo di attrito di 23° in conformità ai parametri utilizzati per i calcoli 3D (**Tabella 6**). I valori positivi della funzione di rottura (punti rossi) corrispondono a uno stato di tensione degli elementi faglie al di là del criterio di rottura e, pertanto, instabile. È importante notare che la maggior parte degli elementi faglie si trovano nel regime elastico. Il numero di punti instabili (al di sopra del criterio di rottura di Mohr-Coulomb) resta molto limitato rispetto al numero complessivo degli elementi faglie. Gli stereonet sulla destra mostrano gli orientamenti dello strike e del dip degli elementi faglia e il valore corrispondente della funzione di rottura di Coulomb. Come osservabile, confrontando i due risultati, gli elementi instabili si trovano principalmente sulle faglie N-S, orientati approssimativamente lungo la direzione dello sforzo orizzontale massimo. Ciò è confermato anche dall'osservazione della resistenza allo scorrimento (= sforzo di taglio (reale)/sforzo di taglio (a rottura)) presentata in **Figura 44b** in cui si osserva variazione del 10% rispetto al valore unitario nominale.

L'analisi non cambia radicalmente se si considera il termine dell'iniezione a ottobre 2042 (**Figura 45**). Anche in questo caso, la maggior parte degli elementi instabili si trova sui piani di faglia orientati in direzione N-S. Si noti come la deformazione plastica generata nei punti instabili sia estremamente contenuta (minore dello 0,01%) come mostrato in **Figura 46**.

Si sottolinea, inoltre, che le pressioni calcolate sono il risultato di un modello dinamico che include compartimenti sigillanti e parzialmente sigillanti. Uno dei compartimenti, a est del cluster B, è completamente separato dal resto del modello, pertanto la pressione non cambia durante i cicli. Questo scenario non è realistico, tuttavia è stato mantenuto nella simulazione geomeccanica come "caso limite" per valutare la stabilità delle faglie e l'integrità della roccia di copertura (cap rock) nel caso in cui i confini selezionati siano soggetti alla pressione differenziale massima possibile durante l'iniezione/la produzione.

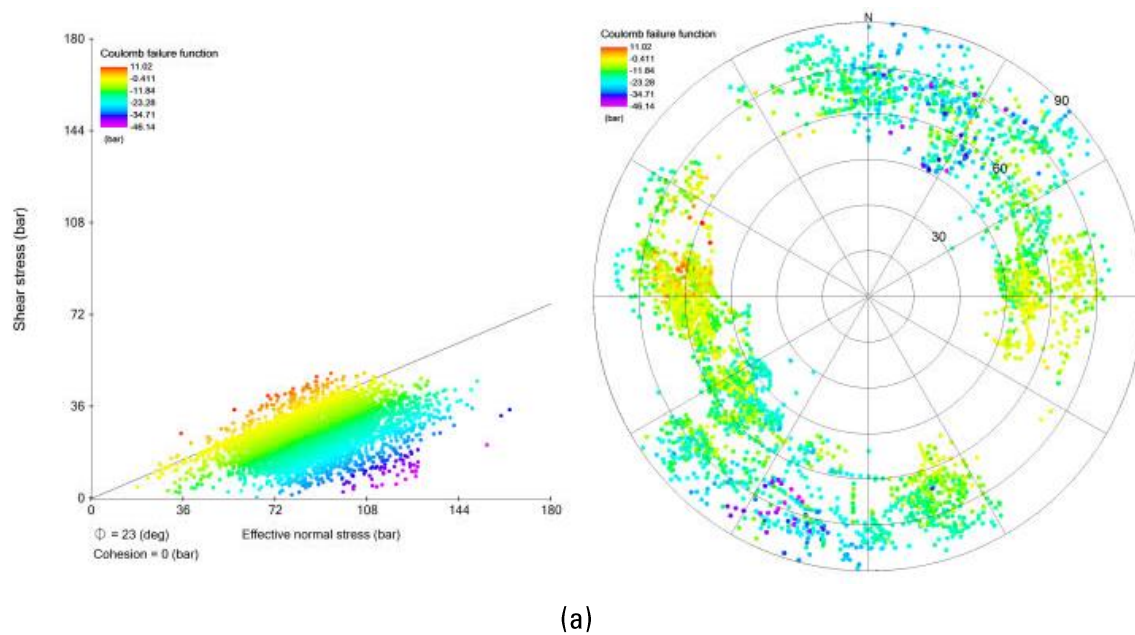


(a)

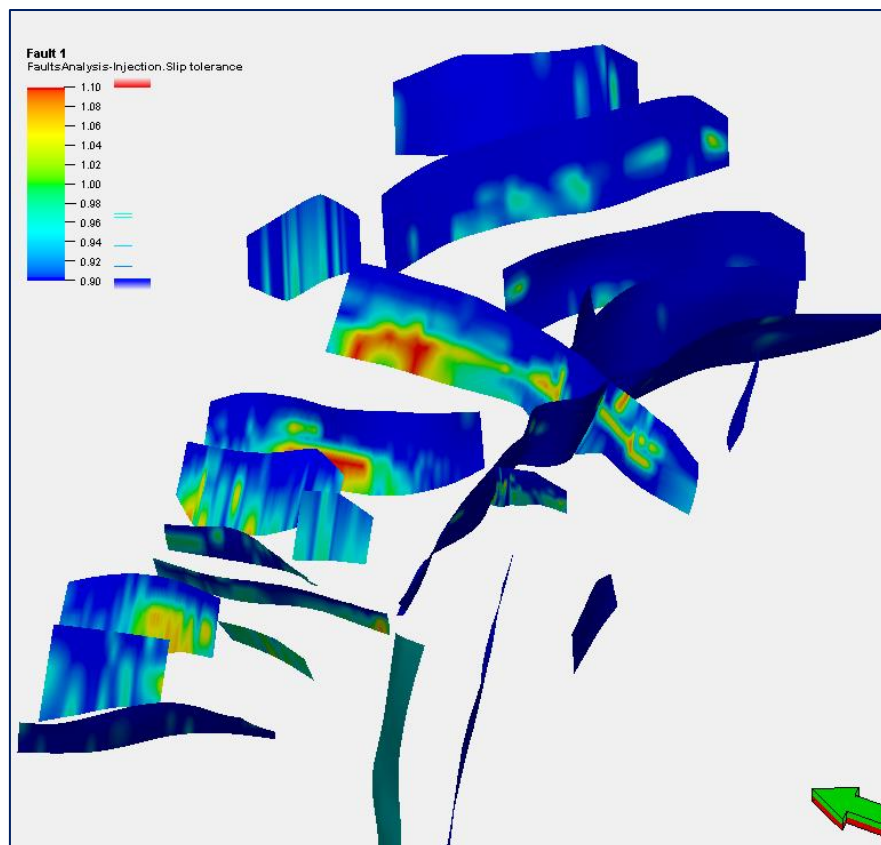


(b)

Figura 44. Analisi di stabilità delle faglie nello stato iniziale svuotato a gennaio 2018 (tutte le faglie): (a) criterio di rottura di Mohr-Coulomb $\phi_{\text{fault}} = 23^\circ$; (b) resistenza allo scorrimento sulle superfici di faglia.



(a)



(b)

Figura 45. Analisi di stabilità delle faglie dopo l'iniezione a ottobre 2042 (tutte le faglie): criterio di rottura di Mohr-Coulomb $\phi_{\text{fault}} = 23^\circ$; (b) resistenza allo scorrimento sulle superfici di faglia.

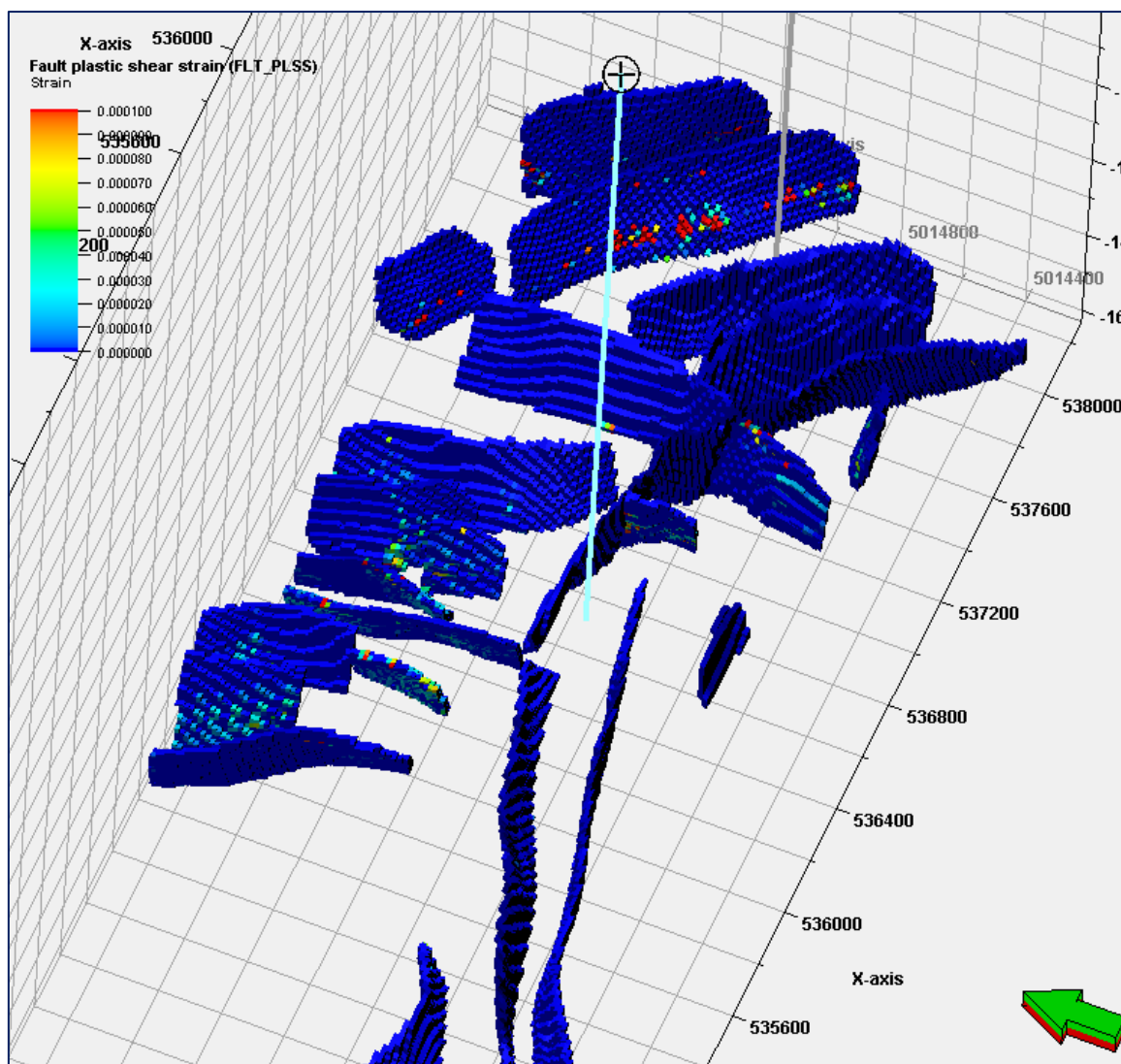


Figura 46. Deformazione plastica a taglio delle faglie dopo l'iniezione a ottobre 2042 (tutte le faglie).

2.5.6.4 Deformazione del piano di campagna (sollevamento e subsidenza)

Per concludere l'analisi, il presente paragrafo illustra la stima del sollevamento e della subsidenza dovuti, rispettivamente, ai cicli di iniezione e di produzione. I risultati in **Figura 47** e in **Figura 48** mostrano l'evoluzione dello spostamento verticale nella sezione dell'anticlinale E-O dopo l'ultima iniezione (ottobre 2042) e dopo l'ultima produzione (aprile 2043). Gli spostamenti a piano campagna dopo l'iniezione a ottobre 2042 e dopo la produzione ad aprile 2043 sono presentati in **Figure 49**.

Il sollevamento elastico del piano campagna durante ciascuna fase di iniezione (pressurizzazione) è variabile per effetto dell'eterogeneità di sforzi/deformazioni all'interno del giacimento. Il sollevamento è totalmente recuperato durante la fase di produzione.

A fine concessione la subsidenza massima in superficie è pari a circa 2,7 cm nel centro del campo. Al contrario nelle zone laterali si osserva un sollevamento dell'ordine di 1 cm.

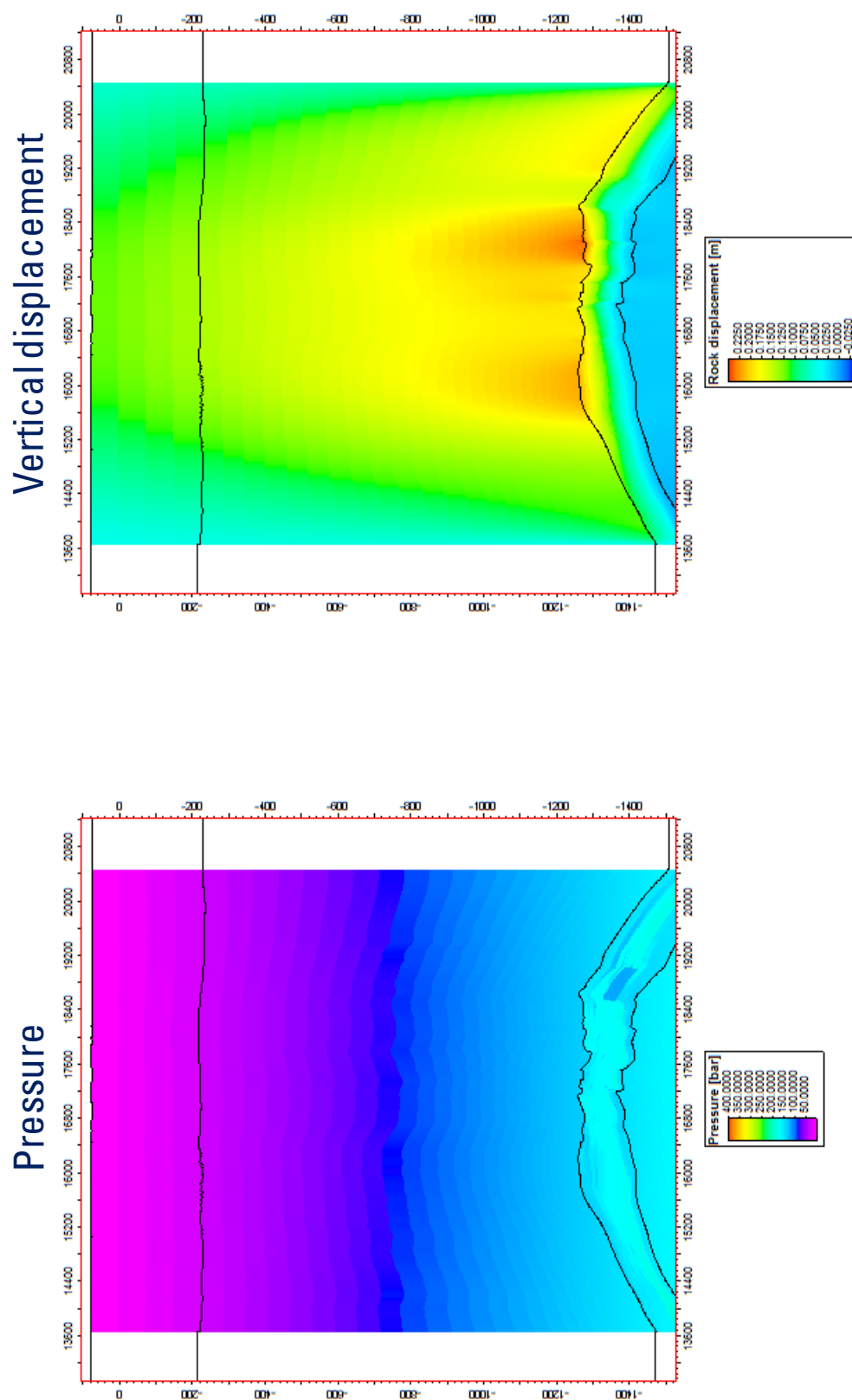


Figura 47. *Spostamenti verticali sulla sezione dell'anticlinale E-O dopo l'iniezione a ottobre 2042.*

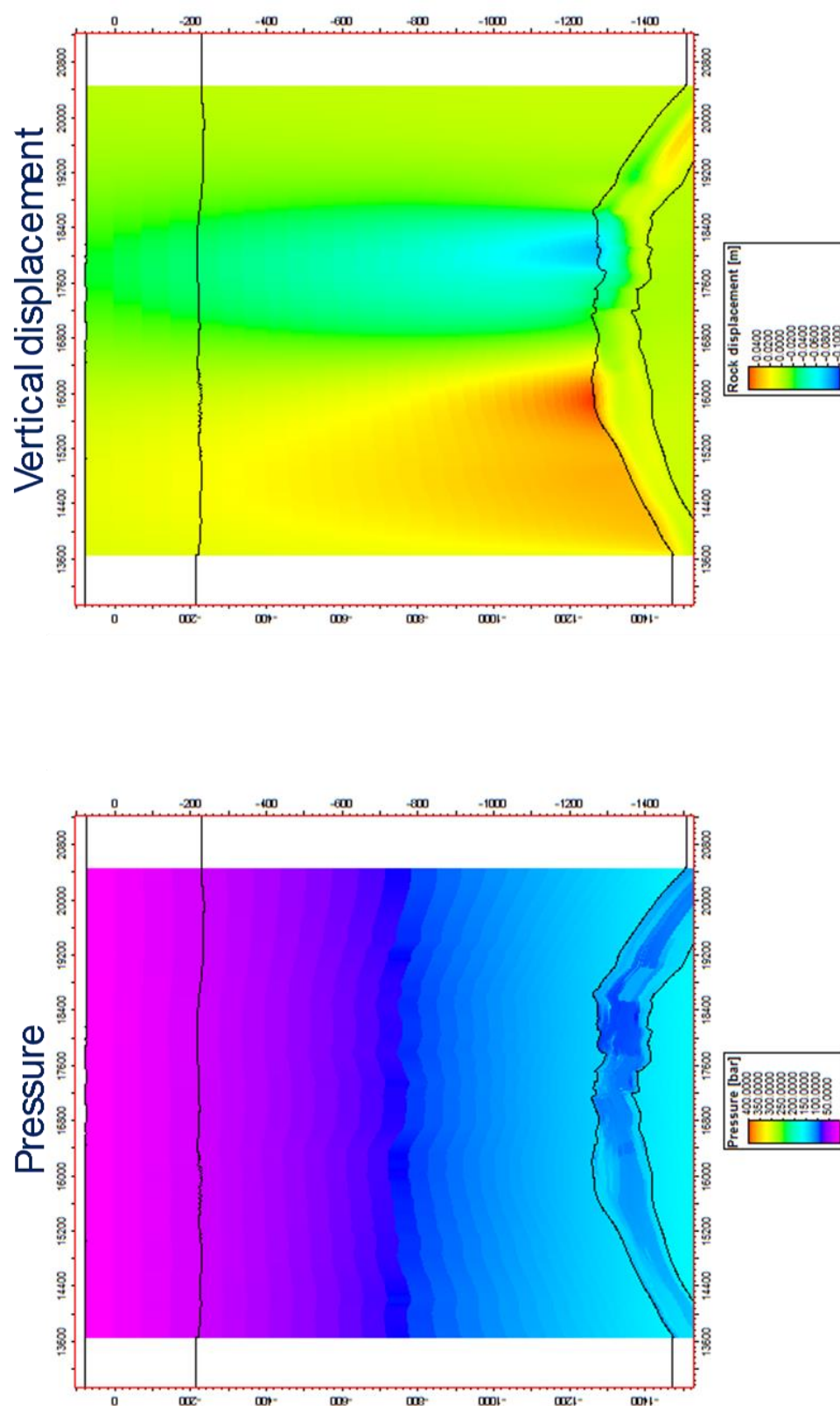


Figura 48. *Spostamenti verticali sulla sezione dell'anticlinale E-O dopo la produzione ad aprile 2043.*

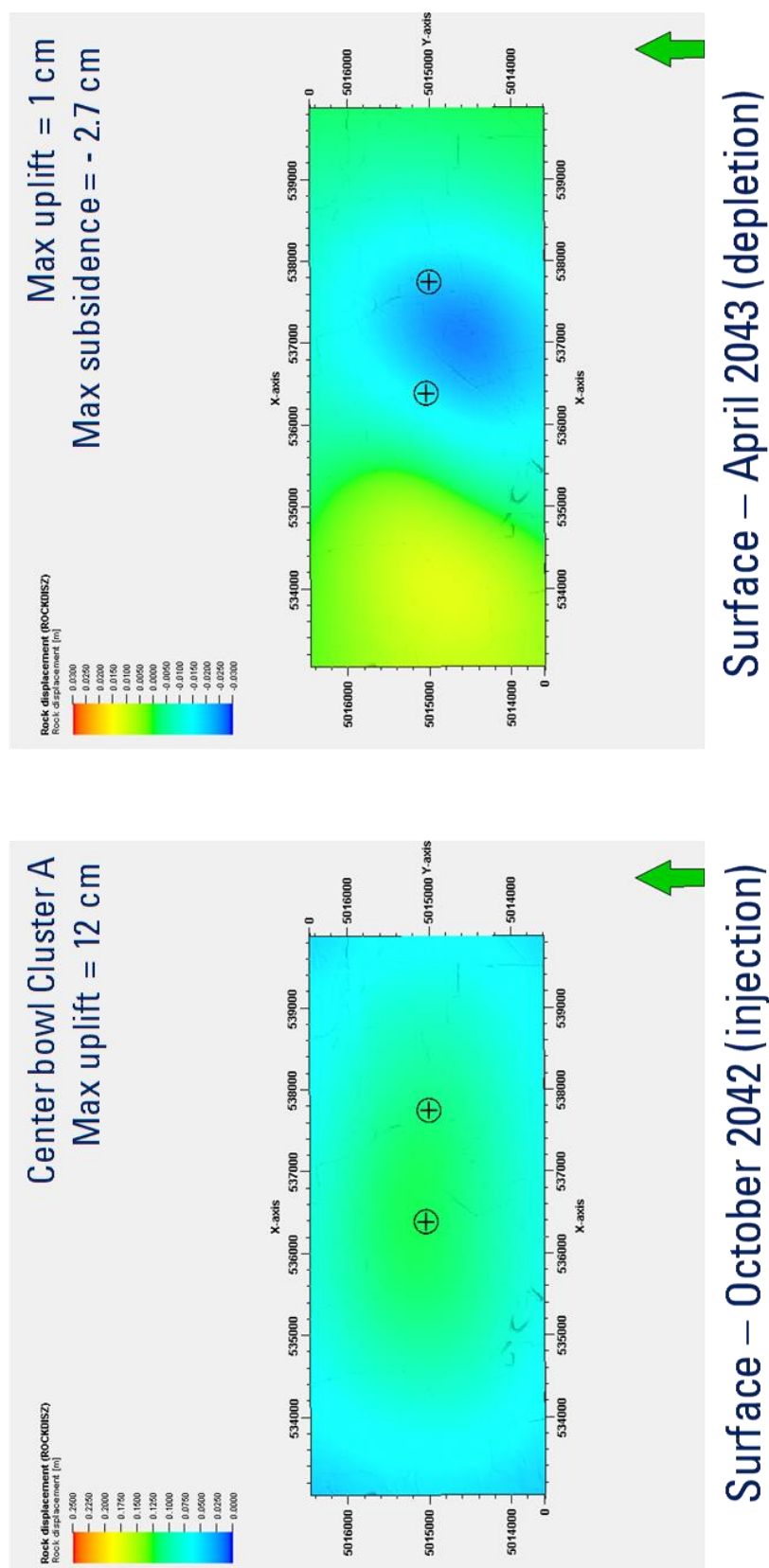


Figure 49. *Spostamenti a piano campagna dopo l'iniezione a ottobre 2042 e dopo la produzione ad aprile 2043.*

2.5.7 Conclusioni dell'analisi geomeccanica 3D del giacimento

I risultati dell'analisi geomeccanica 3D accoppiata con i cicli di pressione (iniezione/produzione) indicano che:

- Durante i cicli di pressione, non si osservano rotture nella roccia di copertura (cap rock) né nel giacimento. Le variazioni degli sforzi/deformazioni si verificano in regime elastico.
- Durante i cicli di pressione, nella maggior parte delle faglie si sono verificati movimenti elastici con condizioni lontane dalla rottura. Le faglie orientate in direzione N-S sono quelle più mobilitate.
- Le deformazioni plastiche (irreversibili) osservate lungo le faglie sono trascurabili (minori dello 0,01%).
- A causa delle variazioni di pressione e della risposta delle faglie, gli sforzi si ridistribuiscono all'interno e attorno al giacimento. Queste variazioni sono associate a spostamenti elastici (reversibili).
- Il sollevamento elastico del piano campagna durante ciascuna fase di iniezione (pressurizzazione) è variabile per effetto dell'eterogeneità di sforzi/deformazioni all'interno del giacimento. Il sollevamento è totalmente recuperato durante la fase di produzione.
- A fine concessione la subsidenza massima in superficie è pari a circa 2,7 cm nel centro del campo. Al contrario nelle zone laterali si osserva un sollevamento dell'ordine di 1 cm.

Il modello geomeccanico 3D disponibile è pronto per essere utilizzato per valutare la stabilità e il peso dei fluidi di perforazione (MWW) delle perforazioni dei pozzi per qualsiasi traiettoria virtuale nell'area o per definire eventuali piani di intervento in caso di abbandono dei pozzi.

2.6 Riferimenti

- [1] Unconfined compressive strength testing, single stage triaxial testing and confined dynamic elastic properties wells: Cornegliano A1 & Cornegliano B1. Als Oil & Gas and Ital Gas. FracTech Laboratories Report 2016, 108 pages.
- [2] Ital Gas Storage Well Cornegliano B01: MDT Stress Test Interpretation. Schlumberger Report 2016, 10 pages.
- [3] Coussy O. 2004. Poromechanics. John Wiley & Son Ltd, 298 pages.
- [4] Heidbach, O., Custodio, S., Kingdon, A., Mariucci, M.T., Montone, P., Müller, B., Pierdominici, S., Rajabi, M., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Williams, J., Ziegler, M. (2016): Stress Map of the Mediterranean and Central Europe 2016, GFZ Data Service, doi:10.5880/WSM. Europe2016.
- [5] Pierdominici S. Mariucci M.T. Montone P. Cesaro M., 2005. Comparison between active stress field and tectonic structures in Northern Italy, Lombardy Region, Ann. Geophys. , 48(6), 867–881.
- [6] Lade PV (1982) Three-parameter failure criterion for concrete. J Eng Mech Div. Am. Soc. Civ. Eng. 108: 850–863.
- [7] The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (6th Ed). O. Zienkiewicz, R. Taylor, J.Z. Zhu. 2005, 752 p.
- [8] Barton, N.R. (1972). A model study of rock-joint deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9, 579-602.
- [9] Zoback, M.D. (2010). Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010, 449 p.