

A thick, solid green vertical bar runs down the left side of the page.

CAMPO DI
GRADIZZA

**Studio della subsidenza
indotta dalla produzione
del campo**

Settembre, 2023



SOMMARIO

1	INQUADRAMENTO DEL CAMPO	1
2	MODELLO GEOLOGICO INTEGRATO	2
2.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	2
2.1.1	<i>Assetto ed evoluzione tettonica e stratigrafica</i>	<i>4</i>
2.2	RICOSTRUZIONE GEOLOGICA 3D	8
2.2.1	<i>Dataset</i>	<i>8</i>
2.2.2	<i>Modello strutturale.....</i>	<i>9</i>
2.2.3	<i>Modello stratigrafico</i>	<i>11</i>
2.3	3D GRID DEL MODELLO STATICO ESTESO	16
2.4	3D GRID DEL MODELLO STATICO DI GIACIMENTO	18
3	MODELLO DINAMICO DI GIACIMENTO	21
3.1	ESTENSIONE DEL MODELLO DINAMICO E DISCRETIZZAZIONE (GRID)	22
3.2	CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA	25
3.3	PROPRIETÀ DEI FLUIDI E DI INTERAZIONE ROCCIA-FLUIDI	26
3.4	INIZIALIZZAZIONE E VOLUMI.....	27
3.5	SCENARIO DI SVILUPPO PER IL RECUPERO DELLE RISERVE DI GAS	30
3.6	MAPPE DI PRESSIONE.....	34
4	STUDIO GEOMECCANICO	35
4.1	DESCRIZIONE DEL SOFTWARE RESERVOIR GEOMECHANICS (PETREL).....	36
4.2	DEFINIZIONE DEL MODELLO	37
4.2.1	<i>Grid</i>	<i>37</i>
4.2.2	<i>Faglie</i>	<i>37</i>
4.2.3	<i>Classificazione geomeccanica.....</i>	<i>37</i>
4.2.4	<i>Caratterizzazione geomeccanica</i>	<i>39</i>
4.3	INIZIALIZZAZIONE DEL MODELLO	45
4.4	PRINCIPI DI ANALISI	46
4.4.1	<i>Analisi effettuate</i>	<i>49</i>
4.4.2	<i>Time-step di analisi.....</i>	<i>49</i>
4.5	ANALISI DEI RISULTATI	50
5	BIBLIOGRAFIA	56
	ALLEGATO A CLASSI GEOMECCANICHE.....	60
	ALLEGATO B RISULTATI - ADDENDUM	62



EXECUTIVE SUMMARY

Il presente rapporto descrive i risultati dello studio condotto da DREAM su richiesta di Aleanna Italia per valutare la subsidenza potenzialmente indotta dalle future attività di produzione del giacimento di Gradizza, sito all'interno del Permesso di Ricerca "La Prospera". I livelli mineralizzati a gas che costituiscono il giacimento, denominati Livello Superiore e Livello Principale, sono caratterizzati da una struttura anticlinalica ubicata nella porzione sommitale della Formazione Carola (Pleistocene). Il giacimento è ubicato alla profondità media di circa 850 m TVDss ed è stato scoperto dal pozzo Gradizza 1. Il giacimento non è mai stato coltivato. Alla data della scoperta del campo la pressione iniziale del Livello Principale era pari a 87.41 barsa (89.13 kg/cm²_a), alla profondità di riferimento (*datum*) di 850.5 m TVDss.

Lo studio rappresenta un aggiornamento della valutazione originale condotta da DREAM nel 2015 su richiesta di NorthSun Italia. L'aggiornamento si è reso necessario in relazione al nuovo modello stratigrafico definito da Aleanna Italia, comprendente oltre al Livello Principale anche il soprastante Livello Superiore, e al nuovo scenario di produzione per il recupero delle riserve di gas, stimato da Aleanna Italia, che prevede la produzione in *commingle* dei livelli Principale e Superiore attraverso completamento singolo nel pozzo Gradizza 1.

Il lavoro tecnico è stato articolato in tre fasi: (1) costruzione del modello geologico esteso del volume di interesse, comprendente i livelli mineralizzati a gas che costituiscono il giacimento di Gradizza, (2) definizione del modello numerico fluido-dinamico del giacimento e dell'acquifero laterale facendo ricorso ad un approccio di tipo volumetrico, (3) messa a punto del modello geomeccanico per la valutazione delle variazioni altimetriche del piano campagna indotte dalla futura produzione degli idrocarburi.

Nella prima fase del lavoro il modello geologico è stato ricostruito sulla base dei dati resi disponibili da Aleanna Italia (Aleanna Italia S.p.A., 2023) e dei dati di pozzo reperibili presso il sito dell'UNMIG (progetto VIDEPI). In particolare, l'assetto stratigrafico e strutturale è stato modellizzato integrando tutti i dati disponibili e implementando il nuovo modello stratigrafico definito da Aleanna Italia. Il modello geologico, comprendente l'intera sequenza oggetto di studio, dai depositi alluvionali prossimi alla superficie fino alla sequenza di calcari e marne, di età Eocenica-Giurassica, al di sotto dei livelli mineralizzati, è stato opportunamente esteso in direzione areale per la successiva simulazione dei fenomeni di subsidenza.

La seconda fase del lavoro ha riguardato la revisione del modello dinamico con implementazione del nuovo scenario di produzione previsto (produzione in *commingle* dei livelli Principale e Superiore attraverso completamento singolo nel pozzo Gradizza 1). Ai fini della valutazione del comportamento geomeccanico è stato necessario ricorrere ad una modellizzazione dell'acquifero di tipo volumetrico in modo da poter determinare la propagazione spaziale e l'evoluzione temporale del disturbo di pressione anche nella porzione di roccia serbatoio occupata dall'acquifero che delimita il giacimento. La risposta dinamica è stata simulata per tutta la durata prevista della coltivazione (35 anni, con pressione di abbandono in giacimento pari a 35 kg/cm²_a) e per ulteriori 40 anni oltre il termine della produzione al fine di verificare la risposta del sistema all'instaurarsi di nuove condizioni di equilibrio a campo chiuso (periodo di monitoraggio).

Nella terza fase del lavoro, a partire dal modello geologico esteso è stato definito il modello geomeccanico, caratterizzato sulla base dei dati ricavati dall'interpretazione dei *log* di pozzo disponibili e dei risultati rappresentativi ottenuti tramite test di laboratorio. Questi dati sono



stati integrati ed estesi nel volume di interesse tramite le informazioni reperite in letteratura ed esperienze pregresse su formazioni analoghe.

Al fine di prevedere l'evoluzione della subsidenza, il modello geomeccanico, una volta popolato ed inizializzato, è stato utilizzato per analizzare il comportamento tenso-deformativo della roccia serbatoio e delle formazioni incassanti indotto dalla futura messa in produzione del giacimento. Il problema è stato affrontato secondo la filosofia delle analisi di sensitività al fine di valutare l'impatto dei parametri più critici (ovvero i moduli elastici) sul fenomeno della subsidenza. È stato quindi definito un possibile intervallo di variazione dell'evoluzione del cono di subsidenza nel tempo (in termini di spostamento verticale massimo ed estensione areale del cono) in relazione allo scenario di sviluppo fornito da Aleanna Italia.

Le variazioni di pressione indotte dalle attività di produzione, soprattutto nell'ipotesi di volumi movimentati medio-bassi come quelli del caso oggetto di studio, inducono deformazioni molto ridotte, dell'ordine di qualche millesimo di m/m, sia in giacimento sia nelle formazioni limitrofe. In tali condizioni i moduli elastici dinamici risultano quelli che più realisticamente riproducono il comportamento deformativo del sistema, mentre l'adozione di moduli elastici statici corrisponde allo scenario più cautelativo. Secondo l'ipotesi più realistica (ovvero parametri elastici dinamici) lo spostamento verticale massimo indotto dalle future operazioni di produzione è stimato pari a -7.5 mm in 35 anni. L'estensione massima del cono di subsidenza viene raggiunta a fine periodo di monitoraggio ed ha un raggio massimo pari a circa 6 km, assumendo una soglia minima di spostamento verticale pari a -1 mm. Il nuovo equilibrio che si instaura nel periodo successivo alla produzione è accompagnato da una progressiva traslazione in direzione nord-ovest del baricentro del cono di subsidenza, dove lo spessore stimato dell'acquifero laterale che delimita il giacimento risulta maggiore, mentre i valori massimi di spostamento verticale si mantengono pressoché inalterati.

Considerando i valori ammissibili di rotazione relativa delle strutture riportati nell'Eurocodice e in numerosi articoli tecnici di settore, gli spostamenti del piano campagna indotti dalla coltivazione futura del giacimento di Gradizza potrebbero indurre rotazioni relative o cedimenti differenziali delle strutture largamente inferiori ai valori limite accettabili.

I valori di subsidenza calcolati mediante la simulazione geomeccanica sono unicamente frutto della produzione ipotizzata dal giacimento di Gradizza, mentre gli effetti imputabili sia ad attività antropiche di altra natura sia a processi geologici/strutturali a scala regionale, oltre ad eventuali effetti dovuti alle operazioni effettuate nei giacimenti limitrofi, non sono stati tenuti in conto per l'impossibilità di quantificare gli stessi.



1 INQUADRAMENTO DEL CAMPO

Il campo di Gradizza è situato nella regione Emilia-Romagna, circa 15 km ad est della città di Ferrara. Il campo ricade nel Permesso di Ricerca "La Prospera" all'interno del quale nel 2013 è stato perforato il pozzo esplorativo Gradizza 1 (Fig. 1.1).

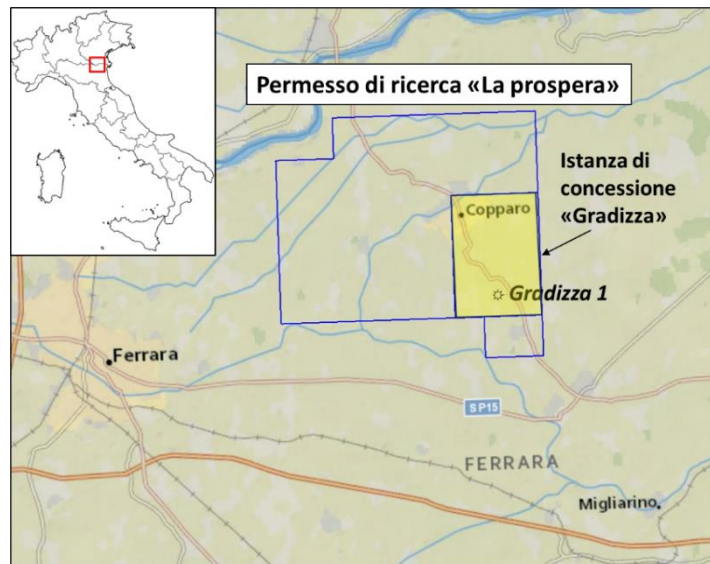


Fig. 1.1: Ubicazione del Permesso di Ricerca "La Prospera".

Secondo la nuova interpretazione stratigrafica effettuata da Aleanna Italia il giacimento è costituito da due livelli mineralizzati, il "Livello Superiore" e il "Livello Principale", che sono stati intercettati dal pozzo Gradizza 1 a una profondità rispettivamente di 837 m TVDss e 850 m TVDss. Le dimensioni del giacimento sono approssimativamente pari a 2.5 km per 1.0 km.

La trappola che delimita il giacimento è di natura strutturale e si presenta come un'anticlinale con orientamento Nord-Sud. La nuova interpretazione delle linee sismiche, effettuata da Aleanna Italia, ha rivelato che la struttura è delimitata da una discontinuità tettonica ad ovest, circoscritta solo al giacimento stesso senza coinvolgere in alcun modo gli strati sovrastanti e sottostanti, mentre verso est la chiusura avviene per pendenza.

Da un punto di vista litostratigrafico, i livelli serbatoio corrispondono a orizzonti sabbioso-siltosi appartenenti alla Formazione Carola, che risale al Pleistocene. La copertura dei due livelli mineralizzati (*caprock*) è costituita da strati di argilla di spessore pari rispettivamente a circa 3 m e 9 m. La *caprock* del Livello Principale è continua e può essere correlata con i pozzi limitrofi a scala regionale. Questo strato appartiene alla sovrastante Formazione Ravenna.

Il campo ad oggi non è ancora stato messo in produzione. La pressione iniziale del Livello Principale è stata misurata al pozzo Gradizza 1 e risulta pari a 87.41 barsa (89.13 kg/cm²_a), alla profondità di riferimento (*datum*) di 850.5 m TVDss.



2 MODELLO GEOLOGICO INTEGRATO

Nel contesto del presente studio geomeccanico, il modello geologico sviluppato integra due componenti principali: il modello statico del giacimento e il modello stratigrafico-strutturale a scala regionale. La creazione del modello stratigrafico-strutturale a scala regionale è stata effettuata mediante un'analisi dei dati dei pozzi situati nelle vicinanze del giacimento, dati disponibili pubblicamente che sono stati reperiti presso il sito dell'UNMIG (<http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it>), nonché attraverso la consultazione della documentazione bibliografica relativa all'area di studio. Per la modellizzazione di dettaglio del giacimento si è fatto riferimento ai recenti risultati dello studio condotto da Aleanna Italia (Aleanna Italia S.p.A., 2023).

2.1 Inquadramento geologico

L'area della Pianura Padana-Adriatico settentrionale si trova in corrispondenza della microplacca Adria, che è coinvolta nella collisione continentale con Eurasia (e.g., Dercourt et al., 1986). Durante il Triassico e il Giurassico, l'intera area è stata influenzata da una fase di *rift* con estensione in direzione E–O (Fantoni & Franciosi, 2010 e referenze nell'articolo) che ha portato alla formazione di bacini delimitati da faglie, le quali hanno causato ampie variazioni di *litofacies* laterali nelle successioni sedimentarie (e.g., Turrini et al., 2016). La successiva evoluzione cenozoica è stata caratterizzata dalla collisione verso nord del sistema dell'Appennino settentrionale che ha portato alla formazione di un bacino di avanfossa sviluppato in direzione NO-SE e propagato verso NNE. Nel Messiniano il fronte dell'Appennino Settentrionale (NA) si è scontrato localmente con il sistema delle Alpi meridionali (e.g., Carminati & Doglioni, 2012; Toscani et al., 2014). Attualmente il sistema dell'Appennino settentrionale si trova sepolto sotto spesse sequenze di sedimenti della Pianura Padana.

Le strutture sepolte e le relative pieghe di propagazione dei sistemi strutturali sono stati studiati mediante linee di riflessione sismica e dati provenienti da pozzi profondi da diversi ricercatori (e.g., Amadori et al., 2017, 2018, 2019; Toscani et al., 2014; Turrini et al., 2014; Pieri & Groppi, 1981).

All'interno della parte esterna della catena Nord Appenninica si identificano tre principali sistemi arcuati di sovrascorrimenti orientati in direzione NE-SO:

- Il sistema delle pieghe del Monferrato, il più interno ed occidentale, che è stato attivo durante il Messiniano e il Pleistocene (Pieri & Groppi, 1981).
- Il sistema delle pieghe emiliane, che rappresenta il sistema centrale di sovrascorrimenti collidente con il sepolto fronte subalpino.
- Il sistema delle pieghe ferraresi-romagnole, ovvero l'elemento strutturale più esterno dell'Appennino settentrionale attivo dal Pliocene Inferiore fino ad oggi (e.g., Pieri & Groppi, 1981; Boccaletti et al., 2011; Toscani et al., 2014), che può essere ulteriormente suddiviso in Pieghe Ferraresi, Pieghe Romagnole e Pieghe Adriatiche.



In particolare, il giacimento di Gradizza si colloca all'interno dei depositi clastici pleistocenici di riempimento dell'avanfossa padana plio-pleistocenica in corrispondenza del settore esterno della Dorsale Ferrarese-Romagnola (**Fig. 2.1**).

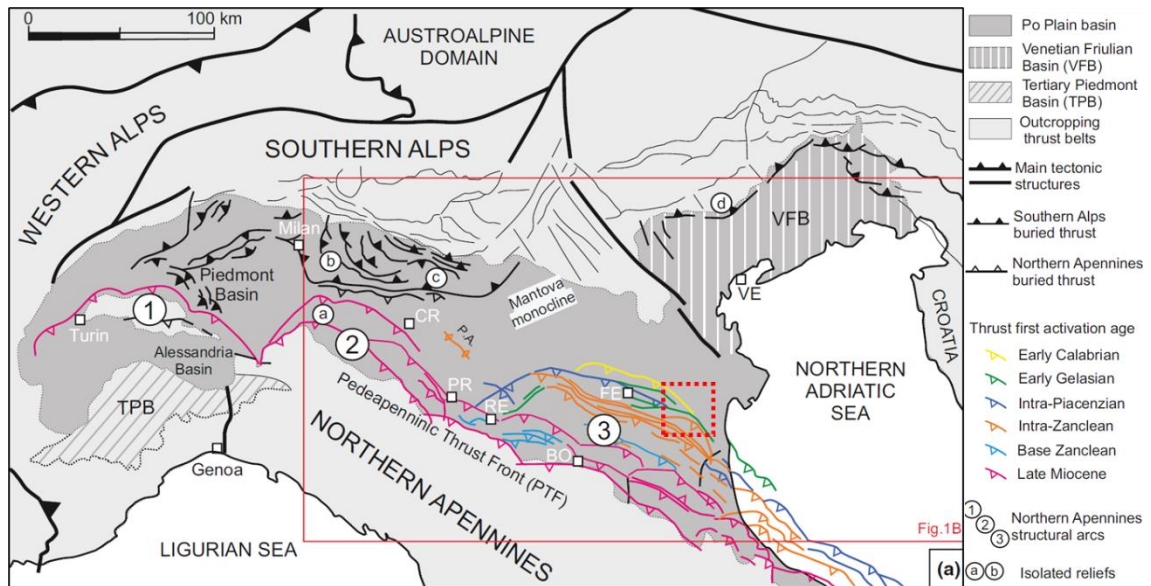


Fig. 2.1: Contesto geologico e strutturale del nord Italia (mod. da Amadori et al., 2019). Il quadrato rosso tratteggiato indica la posizione del giacimento di Gradizza.

I livelli mineralizzati a gas oggetto del presente studio sono situati nella parte superiore della successione torbiditica della Formazione Carola, la quale si è depositata durante il Pleistocene medio-inferiore. Questa deposizione è avvenuta lungo la linea dei sovrascorrimenti appenninici sepolti e nell'*offshore* adriatico.

La trappola geologica che costituisce il giacimento è caratterizzata da un'anticlinale con un asse orientato da nord a sud. Questa trappola è delimitata a ovest da una discontinuità tettonica orientata parallelamente al fianco ovest dell'anticlinale, mentre a nord, sud ed est la chiusura della trappola è determinata dalla pendenza strutturale. La copertura rocciosa che sigilla la mineralizzazione (*caprock*) consiste in uno strato argilloso di circa 6 metri di spessore appartenente alla Formazione Ravenna. Questo strato mostra una notevole continuità laterale a livello regionale.

Nella definizione del modello geologico regionale, è stata presa in considerazione l'intera sequenza stratigrafica compresa tra il substrato carbonatico del Mesozoico e i depositi alluvionali recenti.



2.1.1 Assetto ed evoluzione tettonica e stratigrafica

Il bacino di avanfossa dell'Appennino settentrionale ha subito un'evoluzione attraverso diverse fasi tettoniche successive, che hanno portato a una graduale migrazione verso l'esterno della catena Appenninica con formazione di pieghe e faglie. Questa evoluzione ha portato alla creazione e allo sviluppo di depositi asimmetrici di accrezione, con bacini di *piggy-back* associati (Ori & Friend, 1984).

Dal periodo del Messiniano fino ad oggi, l'avanfossa appenninica può essere suddivisa in grandi depocentri strutturali indipendenti. Il depocentro della Pianura Padana - Avanfossa Adriatica, che comprende l'area più ampia del giacimento di Gradizza, è caratterizzato da spesse successioni di depositi torbiditici del Messiniano, Pliocene e Pleistocene (Ghielmi et al., 2010). Questa regione ha anche subito una significativa attività tettonica nel corso del Pliocene, che ha causato deformazioni, sollevamenti, inclinazioni e fagliazioni dell'area in cui si trova il giacimento. Durante lo stesso periodo (Pliocene Inferiore), si è verificata la deposizione di sedimenti torbiditici (lobi torbiditici di sabbie prossimali e distali), con la formazione delle unità di Porto Corsini e Porto Garibaldi, che si estendono su gran parte dell'avanfossa. In seguito, durante il Pliocene Superiore-Pleistocene, un ulteriore evento tettonico ha portato alla completa formazione delle pieghe e faglie della catena montuosa di Ferrara, nonché al sollevamento e all'inclinazione dell'area attorno a Bologna (Ghielmi et al., 2010).

La configurazione strutturale dell'area è il risultato dell'evoluzione tettonica avvenuta nel periodo plio-pleistocenico dell'avanfossa padano-adriatica (Dondi et al., 1982a; Bigi et al., 1992; Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998; Toscani et al., 2009; Boccaletti et al., 2011). Questa evoluzione ha coinvolto la deformazione di strati geologici che vanno dai depositi di piattaforma mesozoici fino ai sedimenti clastici plio-pleistocenici. Lo spostamento verticale causato da questi lineamenti tettonici rispetto alla superficie di base del Pliocene può variare da alcune decine di metri fino a diverse centinaia di metri (Bigi et al., 1992; Pieri e Groppi, 1981) (**Fig. 2.2**).

A livello regionale, l'entità della deformazione tende a diminuire significativamente man mano che ci si avvicina alla parte superiore della sequenza sedimentaria, fino a scomparire completamente all'interno dei depositi pleistocenici. Questo fenomeno è in linea con una riduzione delle forze tettoniche provenienti dall'Appennino (Pieri e Groppi, 1981; Boccaletti e Martelli, 2004; Ghielmi et al., 2013) (**Fig. 2.3**).

Picotti e Pazzaglia (2008) hanno indagato sull'origine, lo sviluppo e l'avanzamento del fronte dell'Appennino settentrionale, utilizzando dati geologici, geomorfologici, linee sismiche e dati di pozzo. In **Fig. 2.3** sono presentati i risultati della reinterpretezione sismica della "linea C", condotta da Pieri (1987). La posizione geografica della sezione si trova ad ovest del giacimento di Gradizza. Da questa reinterpretezione non emergono evidenze circa il fatto che i principali sistemi strutturali si estendano fino ai livelli Pleistocenici nell'area del giacimento.

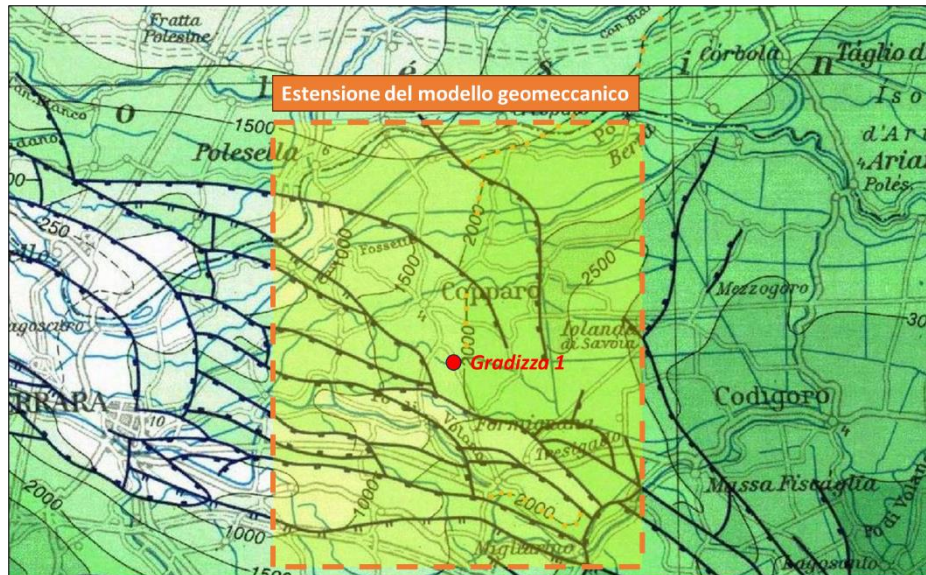


Fig. 2.2: Schema geologico-strutturale del settore nord-appenninico. Le isobate si riferiscono alla profondità della Base del Pliocene (mod. da Bigi et al., 1992). Il punto rosso indica approssimativamente la posizione del pozzo Gradizza 1.

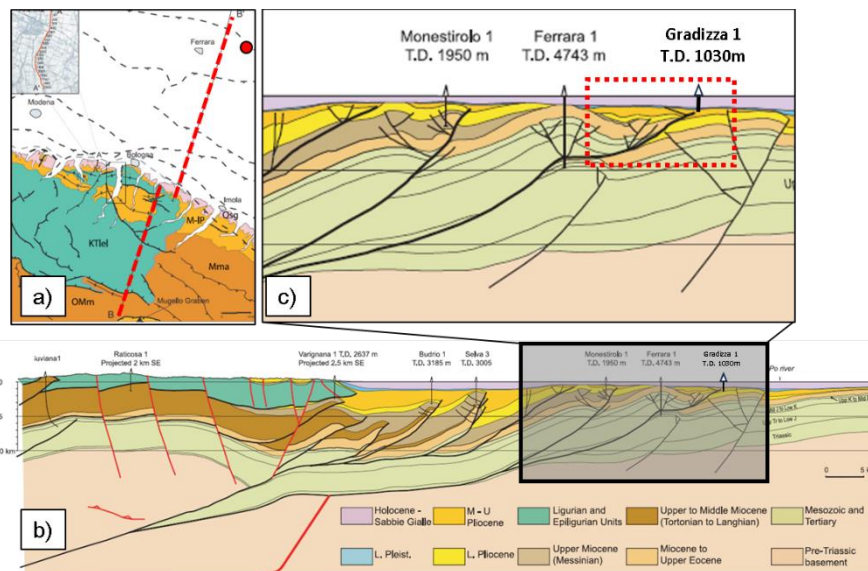


Fig. 2.3: a) Sistema strutturale dell'Appennino settentrionale vicino alle città di Bologna e Ferrara; la linea tratteggiata (rossa) indica la posizione della sezione geologica. b) Sezione geologica re-interpretata dal lavoro di Pieri (1987). c) Dettaglio della sezione con indicazione della posizione del sistema di faglie di sovrascorrimento nella zona di Gradizza (mod. da Picotti e Pazzaglia, 2008). Nella mappa il punto rosso indica approssimativamente la posizione del pozzo Gradizza 1 mentre nelle sezioni è stata inserita la proiezione approssimativa del pozzo.

Più recentemente, Bruno et al. (2020) hanno studiato i meccanismi di subsidenza naturale del suolo nelle zone più densamente popolate della Pianura Padana. Nelle vicinanze del campo di Gradizza si può notare che le strutture sono costituite da faglie imbricate che localmente sono associate a faglie "back-thrust" (Fig. 2.4). In ogni caso, l'attività tettonica sembra esaurirsi al di sotto della base del Pleistocene, senza interessare i livelli stratigrafici sovrastanti.

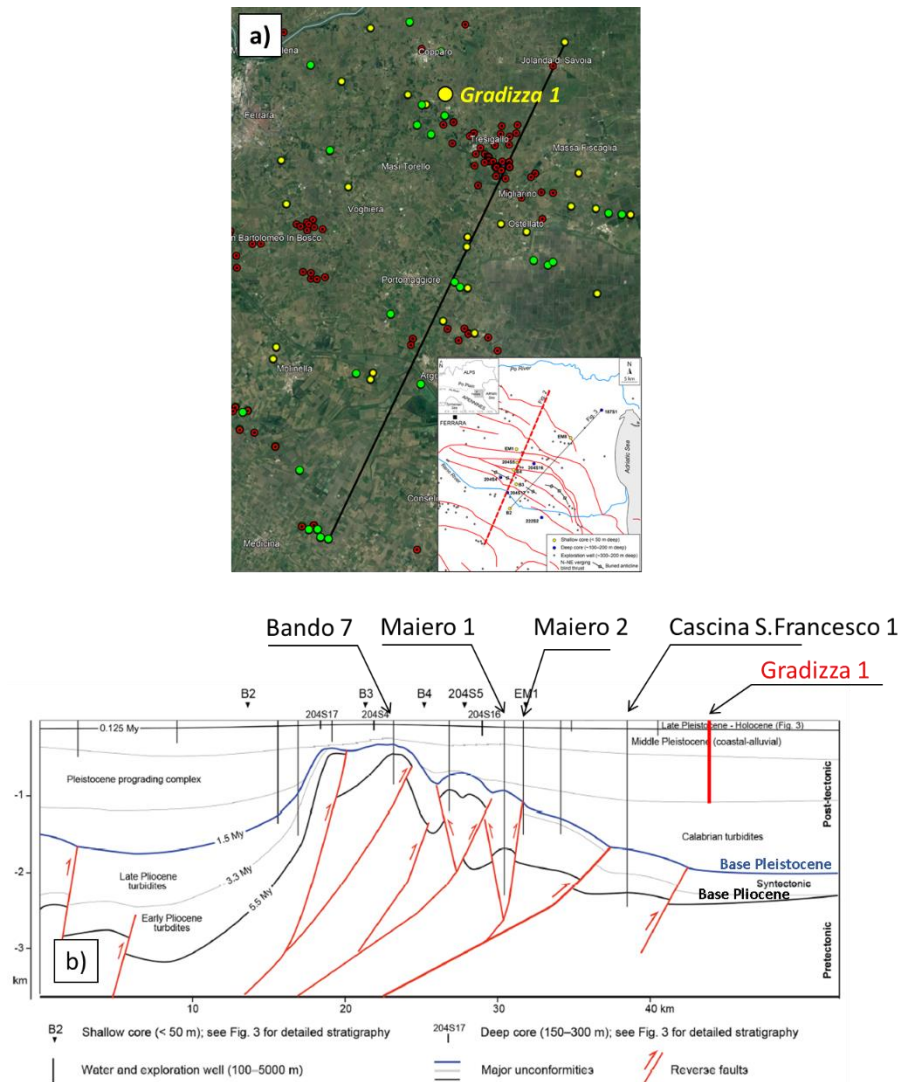


Fig. 2.4: a) Ubicazione della sezione sismica interpretata e del pozzo Gradizza 1. b) Sezione sismica interpretata, perpendicolare alle principali strutture tettoniche nell'area regionale di interesse; in figura è indicata anche la proiezione approssimativa del pozzo Gradizza 1 (linea rossa) (mod. da Bruno et al., 2020).

Dal punto di vista stratigrafico, il substrato pre-pleiocenico dell'area di studio è composto da una sequenza stratigrafica che, partendo dal basso verso l'alto, include le seguenti litologie:

- Dolomie e calcari di piattaforma dall'Eocene al Giurassico.
- Sequenza marnosa della piattaforma esterna/scarpata dall'Eocene medio al Miocene superiore.
- Successione marnoso-evaporitica del Messiniano, nota come Formazione Gessoso-solfifera, che è presente solo in modo limitato nella parte sud-orientale dell'area.



A partire dal Pliocene, la deposizione delle Argille del Santerno segna l'inizio dell'instaurazione di un bacino di avanfossa allungato da E-O a NO-SE. All'interno di questo bacino si sono accumulate abbondanti sequenze torbiditiche, identificate come Formazioni Porto Corsini e Porto Garibaldi. Tuttavia, in corrispondenza delle zone più elevate dal punto di vista strutturale e dei margini dell'avanfossa, che non sono raggiunti dai depositi torbiditici, la successione pliocenica è costituita esclusivamente dalle Argille del Santerno (Ghielmi et al., 2013).

Durante il Pleistocene inferiore, questa parte della Pianura Padana ha registrato una fase regressiva, passando da un ambiente marino profondo a uno marino poco profondo, e infine a un ambiente continentale. Questa transizione è stata accompagnata dalla deposizione delle Sabbie di Asti, secondo la definizione di Dondi (1982a). In questo contesto, si sono depositate inizialmente le torbiditi della Formazione Carola durante il Pleistocene medio-inferiore, seguite dai depositi di ambiente litorale, di piattaforma e di scarpata della Formazione Ravenna nel Pleistocene superiore e medio ("sequenza PS2" in Ghielmi et al., 2010, 2013) (**Fig. 2.5**).

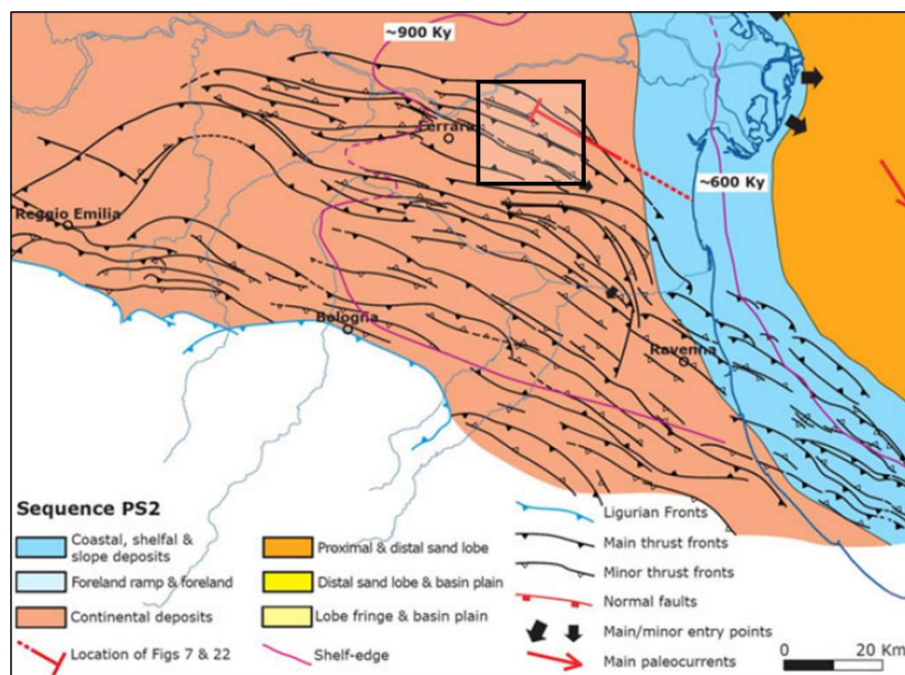


Fig. 2.5: Modello stratigrafico della "sequenza PS2" del Pleistocene (mod. da Ghielmi et al., 2013); il rettangolo nero indica approssimativamente il perimetro del modello geomeccanico.



2.2 Ricostruzione geologica 3D

Il modello geologico 3D, esteso a scala regionale ai fini della modellizzazione geomeccanica, è stato generato utilizzando il software Petrel Geomechanics (Schlumberger TM).

Il giacimento di Gradizza, oggetto del presente studio, ha dimensioni areali di circa 2.5 x 1.0 km², mentre il modello geologico esteso risulta avere dimensioni di circa 29.0 x 29.0 km², comprendendo verticalmente 4.5 km di sequenza stratigrafica. Tale estensione è sufficiente a garantire condizioni di bordo indisturbate in fase di simulazione geomeccanica.

Le principali caratteristiche stratigrafiche e strutturali a scala regionale sono state ricostruite e integrate con il modello stratigrafico e strutturale del giacimento basandosi sui dati di pozzo e sui modelli concettuali disponibili in letteratura.

2.2.1 Dataset

I dati a disposizione per la costruzione del modello geologico 3D a scala regionale, integrato con il modello 3D a scala di giacimento, includono:

- Coordinate di testa pozzo e traiettoria del pozzo Gradizza 1 (fornite da Aleanna Italia).
- Set di *log* litologici (potenziale spontaneo e *gamma ray*), *log* di densità, *caliper*, *log* sonici e *log* di resistività per il pozzo Gradizza 1 (forniti da Aleanna Italia).
- Coordinate di testa pozzo, traiettorie e profili in scala 1:1000 di 11 pozzi limitrofi reperiti presso la banca dati *on-line* dell'UNMIG e utilizzati per l'estensione del modello a scala regionale (Sabbioncello 1, Sabbioncello 4, Sabbioncello 6, Tresigallo 10, Tresigallo 11, Cascina Buzzoni 1, Copparo 1, Montecchio 1, Baura 1, Gualdo 1, Vignola 1).
- Progetto Petrel che include il modello 3D del giacimento di Gradizza con i tagli stratigrafici relativi al Livello Principale e al Livello Superiore (fornito da Aleanna Italia).
- Documentazione tecnica (Aleanna Italia S.p.A., 2023) che include i risultati della reinterpretazione sismica e la nuova interpretazione deposizionale e strutturale del giacimento di Gradizza.
- Studio di giacimento del campo di Gradizza "Relazione tecnica – Istanza di Concessione di Coltivazione denominata Gradizza" effettuato da NorthSun Italia (2014).
- Documentazione bibliografica relativa all'area oggetto di studio.



2.2.2 Modello strutturale

L'ubicazione e la geometria dei lineamenti tettonici all'interno dell'area modellizzata sono state definite sulla base del dato sismico disponibile per la zona *reservoir* e del dato di pozzo, nonché in riferimento allo stato dell'arte (Bigi et al., 1992; Boccaletti e Martelli, 2004; Turrini et al., 2014; Pieri e Groppi, 1981; Cremonini e Ricci Lucchi, 1982; Amadori et al., 2019; Bruno et al., 2020).

Secondo l'interpretazione deposizionale effettuata da Aleanna Italia (2023), il giacimento è composto da depositi formati da canali e lobi sedimentari (**Fig. 2.6**). La reinterpretazione dei dati sismici ha rivelato una superficie erosiva (indicata in figura dalla linea verde) situata alla base dell'intervallo mineralizzato a gas, a sua volta identificato come un canale. Successivamente, questo canale è stato riempito con depositi di lobi sedimentari che si sono estesi lateralmente, seguendo una sequenza tipica di riempimento retrogradante.

Le faglie che inizialmente erano state interpretate come i confini orientali e occidentali del giacimento, sono ora reinterpretate come i margini del canale alla base della sequenza sedimentaria. Questa nuova interpretazione risulta più congruente con il basso angolo di inclinazione delle superfici precedentemente identificate come faglie. In base a questa reinterpretazione, il giacimento è delimitato verso ovest da una faglia che coincide con il margine del canale e che si estende verso est con lieve pendenza.

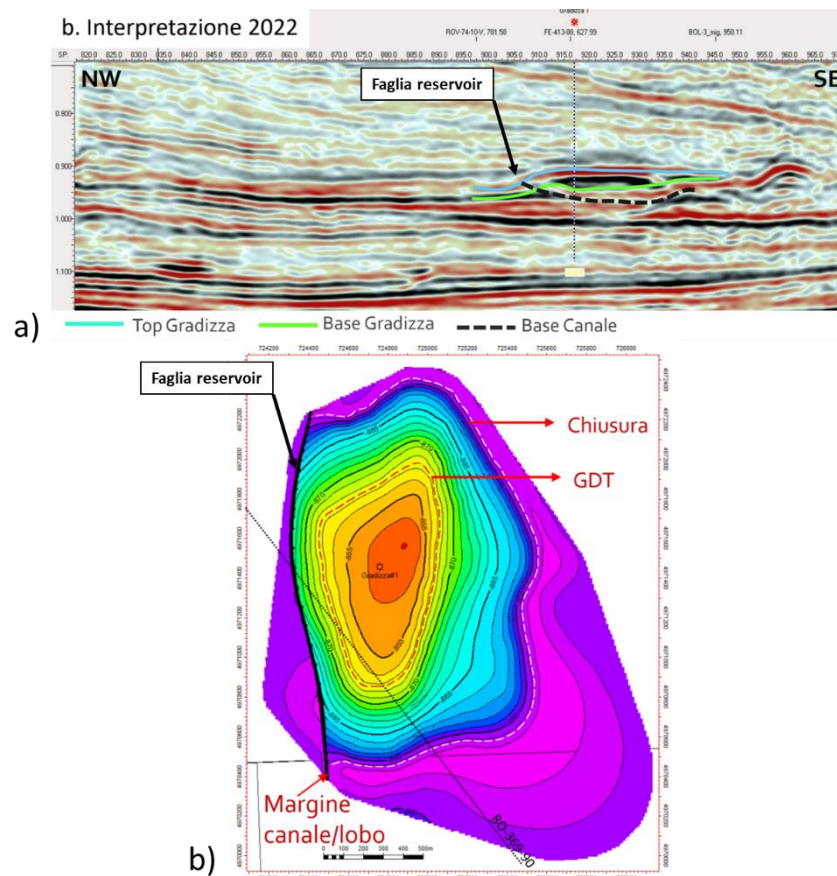


Fig. 2.6: a) Interpretazione sismica della linea ROV-369-90 con indicazione del Top e Bottom del giacimento e del margine del canale verso ovest. B) Mappa del Top strutturale del Livello Principale del giacimento di Gradizza.



All'interno del *grid* 3D è stato integrato il modello strutturale derivante dall'interpretazione geofisica eseguita da Aleanna Italia. Una discontinuità tettonica con direzione media N-S, di modeste dimensioni, interessa il giacimento e la roccia di copertura (*caprock*) in corrispondenza del fianco ovest dell'anticlinale. I rigetti massimi associati a tale discontinuità sono di circa 10 m.

A partire da mappe e sezioni geologiche reperite in letteratura, all'interno del modello 3D sono stati integrati i principali lineamenti tettonici di significato regionale (**Fig. 2.7**). In particolare, sono stati riconosciuti due sistemi di sovrascorrimenti:

- un sistema principale di *thrust* e *backthrust* rispettivamente a vergenza NE e SO, caratterizzato da una direzione media da E-O a circa N-S;
- un sistema minore, sviluppato solo nel settore sud-orientale, con direzione NE-SO.

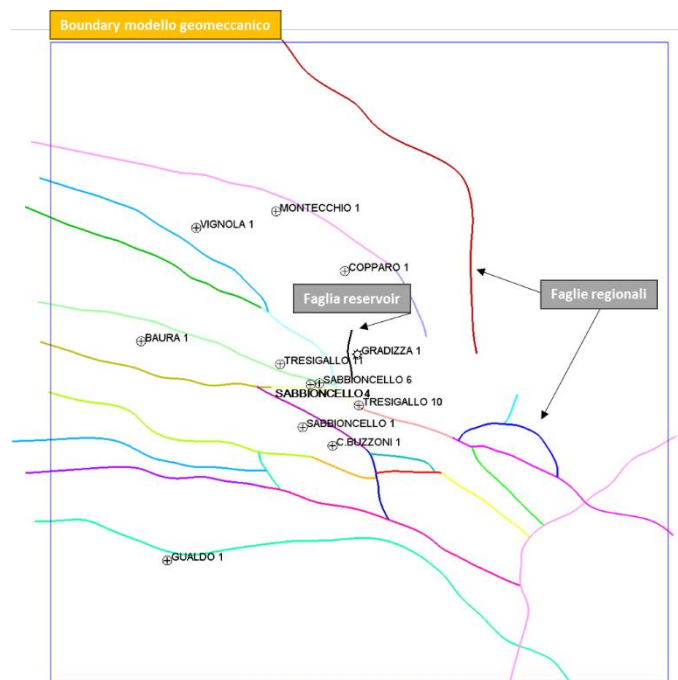


Fig. 2.7: Discontinuità tettoniche integrate nel modello geologico 3D con ubicazione dei pozzi di riferimento.

In riferimento all'area estesa, il sistema di sovrascorrimenti regionali controlla lo sviluppo di alti e bassi strutturali con direzione media NO-SE, ben evidenziati dalla morfologia della superficie di base del Pliocene ricostruita a partire dai dati bibliografici (Bigi et al., 1992; Pieri e Groppi, 1981) (**Fig. 2.2** e **Fig. 2.3**). Tutti i sovrascorrimenti regionali sono stati estesi verticalmente a partire dal substrato pre-Pliocenico fino alle sabbie di Asti, in accordo con l'interpretazione di Toscani et al. (2009) e quella di Boccaletti e Martelli (2011).

Le evidenze più recenti all'interno della documentazione scientifica indicano che le faglie regionali non creano dislocazioni all'interno dei depositi più recenti del Pleistocene inferiore (e.g., Bruno et al., 2020) e nessuna di loro interessa i livelli mineralizzati e quelli sovrastanti.



2.2.3 Modello stratigrafico

L'assetto stratigrafico a scala di giacimento e a scala regionale è stato definito sulla base dei dati di 12 pozzi (Gradizza 1 e 11 pozzi esterni al giacimento e ubicati nelle aree limitrofe) (**Fig. 2.7**), nonché sulla base dei modelli strutturali e stratigrafici di riferimento per questo settore (Bigi et al., 1992; Pieri e Groppi, 1981; Dondi et al., 1982b; Boccaletti e Martelli, 2004).

Correlazione ai pozzi

Sulla base dell'analisi del dato di pozzo, la successione stratigrafica dell'area è stata suddivisa, dall'alto verso il basso stratigrafico, in 12 unità litostratigrafiche (**Fig. 2.8**):

1. **Alluvioni**, corrispondenti a intercalazioni di sabbie ghiaiose e localmente argillose recenti.
2. **Sabbie di Asti superiori**, corrispondenti a sabbie argillose di ambiente da marino a continentale (Pleistocene).
3. **Caprock** superiore, corrispondente alle argille di copertura del Livello Superiore del giacimento (Pleistocene).
4. **Reservoir (Livello Superiore)**, corrispondente a sabbie argillose di ambiente marino (Pleistocene).
5. **Caprock** principale, corrispondente alle argille di copertura del Livello Principale del giacimento (Pleistocene).
6. **Reservoir (Livello Principale)**, corrispondente a sabbie e sabbie argillose di ambiente marino (Pleistocene).
7. **Sabbie di Asti inferiori**, corrispondenti a sabbie argillose di ambiente marino (Pleistocene).
8. **Argille del Santerno**, corrispondenti a prevalenti argille con subordinate sottili intercalazioni sabbiose (Pliocene).
9. **Torbiditi plioceniche**, corrispondenti a sabbie torbiditiche con sottili intercalazioni argilloso-siltose (Pliocene).
10. **Gessi**, corrispondenti a gessi e marne gessose di ambiente evaporitico (Miocene superiore).
11. **Marne sabbiose**, corrispondenti a marne argillose con intercalazioni sabbiose di scarpata (Eocene - Miocene).
12. **Calcari e dolomie**, corrispondenti a calcari, calcari dolomitici e dolomie di piattaforma (Triassico - Eocene).



Tali unità risultano continue all'interno dell'area modellizzata, ad eccezione delle torbiditi plioceniche (sviluppate a sud degli alti strutturali dei pozzi Sabbioncello e Tresigallo) e dei gessi (non presenti nel settore nord-occidentale dell'area).

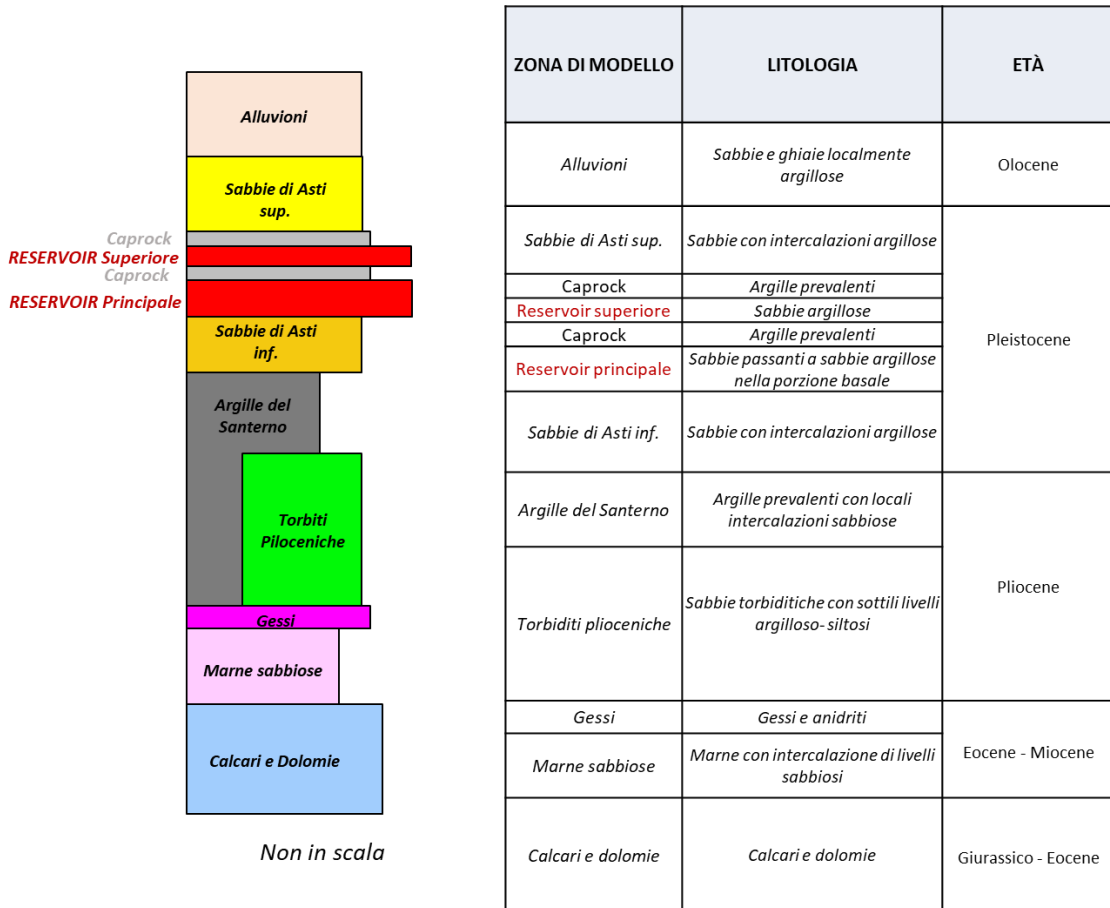


Fig. 2.8: Zonazione stratigrafica del modello geologico 3D a scala regionale.

L'analisi dei profili di pozzo in scala 1:1000 ha evidenziato che:

1. Le **Alluvioni** presentano uno spessore medio di circa 120 m; lo spessore massimo è osservato al pozzo Gradizza 1 (292.5 m).
2. Le **Sabbie di Asti superiori** presentano spessori omogenei con una media di 690.0 m circa; lo spessore maggiore è osservato al pozzo Tresigallo 10 (860.0 m).
3. L'intervallo argilloso che costituisce la **caprock** risulta ben riconoscibile e correlabile ai pozzi presenti nel modello (NorthSun Italia, 2014). Tale livello risulta avere uno spessore medio di 6.0 m e spessore massimo in corrispondenza del pozzo Gradizza 1 di circa 9.0 m.
4. Il **top** e il **bottom** dei due livelli **reservoir** sono stati identificati al pozzo Gradizza 1 e successivamente sono stati estesi su tutta l'area modellizzata mantenendo gli spessori medi ritrovati al pozzo. Tale assunzione è stata fatta perché la bassa



risoluzione dei dati disponibili permettono solamente un'analisi approssimativa delle variazioni dello spessore ai vari pozzi e non un'analisi dettagliata riguardo la geometria e l'estensione dei corpi sedimentari che costituiscono il *reservoir* nell'area regionale.

5. Le **Sabbie di Asti inferiori** rappresentano la porzione della Formazione Sabbie di Asti che si estende al di sotto dei livelli *reservoir*. Tale intervallo presenta uno spessore medio di circa 275.0 m; lo spessore maggiore è osservato al pozzo Copparo 1 (759.0 m), con un *trend* di assottigliamento in direzione O verso il pozzo Baura 1 (35.5 m).
6. Le **Argille del Santerno** presentano uno spessore medio di circa 160 m; gli spessori maggiori risultano concentrati nella zona centrale dell'area modellizzata. Lo spessore massimo è osservato al pozzo Baura 1 (395.5 m), mentre lo spessore minimo è osservato al pozzo Copparo 1 (26.1 m).
7. Le **torbiditi plioceniche** sono state osservate al solo pozzo Gualdo 1 nella parte SO dell'area modellizzata, con uno spessore di 459.3 m.
8. I **gessi** sono intercettati da 6 pozzi all'interno dell'area di modello. Di questi, i pozzi Cascina Buzzoni 1, Sabbioncello 1 e Tresigallo 11 intercettano il *bottom* del livello presentando spessori rispettivamente di 54.0 m, 31.5 m e 8.5 m, mentre le traiettorie dei pozzi Baura 1, Copparo 1 e Tresigallo 10 terminano all'interno del livello stesso non raggiungendone il *bottom*.
9. Il *top* delle **marne sabbiose** è intercettato da 8 pozzi (Baura 1, Cascina Buzzoni 1, Gualdo 1, Montecchio 1, Sabbioncello 1, Sabbioncello 4, Sabbioncello 6 e Vignola 1); di questi, l'unico pozzo che intercetta la base del livello è il pozzo Vignola 1 al quale si osserva uno spessore di 1314.0 m.
10. Il *top* dei **calcari** e delle **dolomie** di piattaforma è intercettato dal solo pozzo Vignola 1 alla profondità di 2194.2 m TVDss. Lo spessore osservato al pozzo è di circa 1280 m; tale spessore non corrisponde tuttavia allo spessore totale della formazione poiché la base stratigrafica non è stata raggiunta dal pozzo.



Superfici stratigrafiche

Per condurre una modellizzazione accurata dell'assetto stratigrafico dell'area di interesse a scala regionale, sono state utilizzate cinque superfici di rilevanza regionale.

La superficie di base del Pliocene è stata ricostruita utilizzando la cartografia geologica di riferimento, che si basa sull'analisi integrata di sezioni sismiche e dati di pozzo provenienti da diverse fonti (e.g., Pieri e Groppi, 1981; Bigi et al., 1992; Boccaletti e Martelli, 2004; Turrini et al., 2014).

Le altre quattro superfici di interesse regionale (*Top Caprock* principale, *Top Reservoir* Principale, *Top Pliocene*, *Top Calcari*) sono state ricostruite mediante l'interpolazione dei tagli stratigrafici (definiti attraverso correlazione con i dati di pozzo) e utilizzando le informazioni presenti nella documentazione tecnica fornita da Aleanna Italia (Aleanna Italia S.p.A., 2023) e i dati presenti nella relazione di NorthSun Italia (NorthSun Italia S.p.A., 2014). La ricostruzione delle superfici è stata effettuata nel rispetto dei *trend* strutturali regionali per garantire una rappresentazione accurata dell'assetto stratigrafico dell'area.

Nel seguito vengono descritte le procedure utilizzate per la ricostruzione delle superfici di rilevanza regionale, partendo da quella più superficiale e procedendo verso il basso nell'intervallo stratigrafico:

- **Top Caprock principale:** questa superficie è stata ricostruita utilizzando come punto di riferimento le indicazioni e la mappa interpretata a scala regionale riportate nella relazione tecnica di NorthSun Italia (2014) e i *log* presenti nei profili di pozzo a scala 1:1000.
- **Top Reservoir Principale:** la ricostruzione di questa superficie è stata eseguita in modo coerente rispetto alla superficie del *Top Caprock* principale, basandosi sulla mappa di *Top* del Livello Principale del giacimento interpretata da Aleanna Italia (**Fig. 2.6b**).
- **Top Caprock superiore:** questa superficie è stata ricostruita utilizzando come punto di riferimento la mappa del *Top Caprock* principale. La superficie è stata modellizzata in modo da garantire uno strato di roccia di copertura con uno spessore di circa 3 metri.
- **Top Reservoir Superiore:** per ricostruire questa superficie è stata utilizzata la mappa del *Top Caprock* principale. La superficie è stata costruita in modo da garantire uno spessore costante del livello mineralizzata di circa 4 metri all'interno del modello geologico regionale, così come identificato al pozzo Gradizza 1.
- **Top Pliocene:** in linea con i modelli geologici regionali, questa superficie è stata ricostruita per seguire la geometria della superficie sottostante della Base del Pliocene. Ciò è stato fatto al fine di rappresentare le variazioni di elevazione e depressione in una direzione approssimativamente NO-SE. Questi fenomeni strutturali sono collegati agli sovrascorrimenti appenninici.



- **Base del Pliocene:** questa superficie è stata digitalizzata prendendo spunto da Bigi et al. (1992). Dal punto di vista stratigrafico, la superficie coincide con la base dei depositi pliocenici nell'avanfossa. Nella parte meridionale del modello essa rappresenta la base dei depositi torbiditici, mentre nel resto dell'area corrisponde alla base delle Argille del Santerno.
- **Top Calcari e Dolomie:** in linea con i modelli geologici regionali (Boccaletti e Martelli, 2004; Boccaletti et al., 2011), questa superficie rappresenta la sommità dei depositi di piattaforma carbonatica.

La ricostruzione delle superfici stratigrafiche nell'area di studio è il risultato di un approccio multidisciplinare che ha incorporato dati sismici, informazioni provenienti da pozzi e conoscenze geologiche regionali al fine di ottenere una rappresentazione accurata e dettagliata dell'assetto stratigrafico.

All'interno della sequenza definita da tali superfici, la zonazione di modello è stata ricostruita attraverso l'utilizzo di mappe isocore a partire dai tagli ai pozzi e tenendo conto dei rapporti stratigrafici tra le varie unità.

La **Fig. 2.9** e la **Fig. 2.10** mostrano rispettivamente una vista del modello 3D e una sezione E-O della sequenza modellizzata passante per il giacimento di Gradizza.

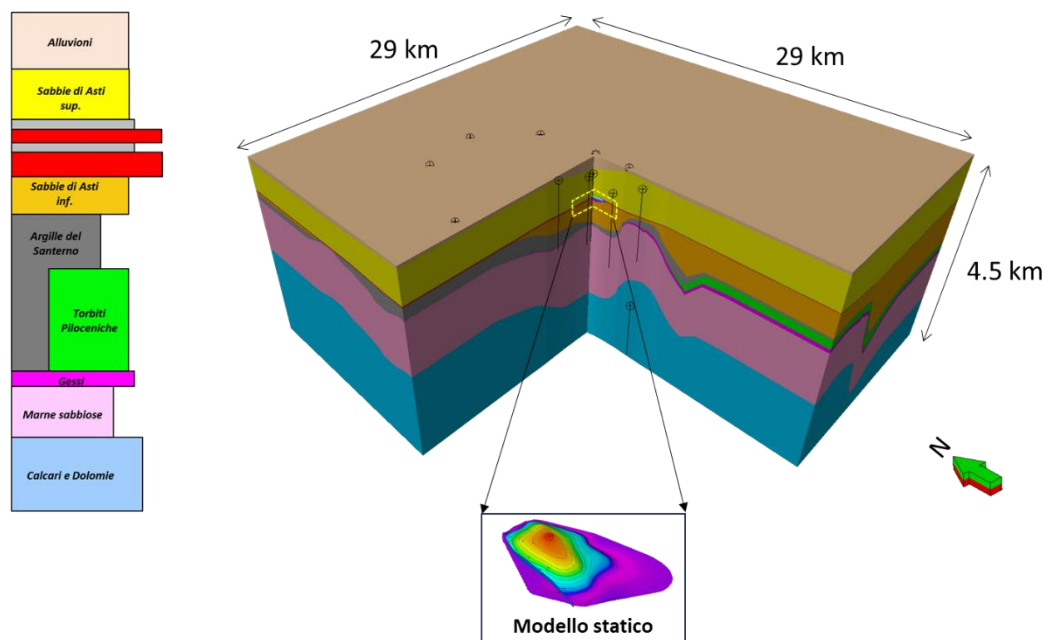


Fig. 2.9: Dimensioni del modello geologico 3D con indicazione della zonazione e della sequenza modellizzata.

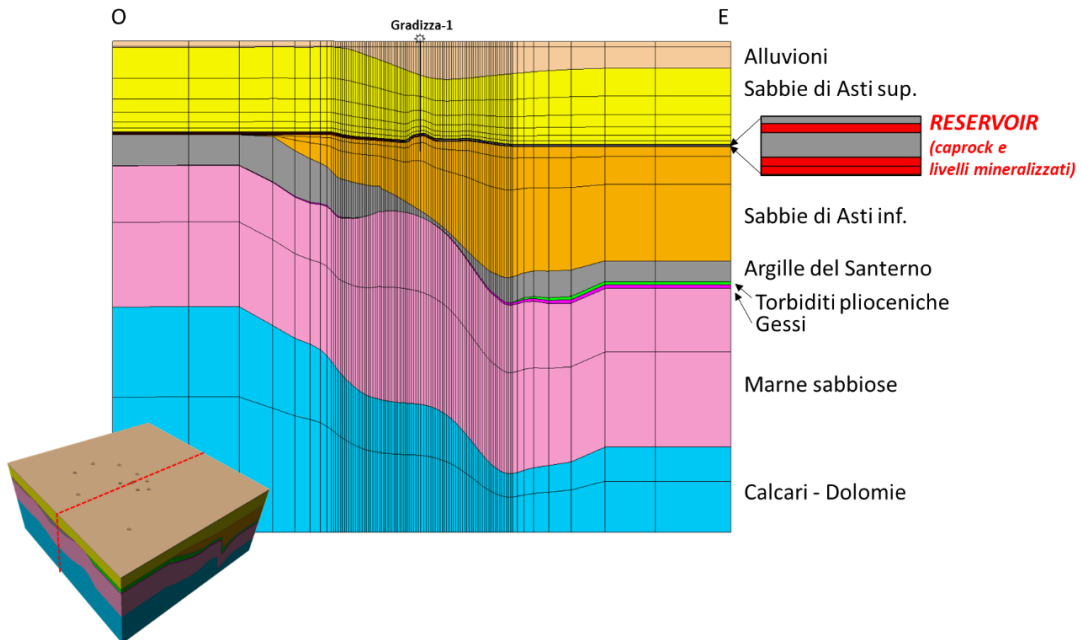


Fig. 2.10: Sezione E-O del modello geologico 3D in corrispondenza del giacimento di Gradizza.

2.3 3D grid del modello statico esteso

Il modello statico esteso è stato costruito, ai fini della successiva modellizzazione geomeccanica, in modo da garantire la rappresentatività dell'assetto geologico, strutturale e stratigrafico sia a scala regionale sia a scala di giacimento. Inoltre, il *grid* 3D è stato generato in modo da soddisfare i seguenti ulteriori requisiti:

- idoneità alla simulazione fluidodinamica a scala di giacimento;
- idoneità alla simulazione geomeccanica a scala regionale.

È stata adottata una discretizzazione areale delle celle di $100 \times 100 \text{ m}^2$ in corrispondenza della zona di giacimento e dell'acquifero laterale circostante che risente delle variazioni di pressione indotte dalla produzione di gas, in modo da garantire un buon grado di dettaglio per l'analisi dei fenomeni tenso-deformativi, pur contenendo i tempi di calcolo entro limiti accettabili. È stata invece adottata una discretizzazione progressivamente più lasca a partire dal limite esterno della zona di giacimento verso le aree più esterne del modello. Più in dettaglio, le zone periferiche del modello sono state descritte adottando celle di dimensioni crescenti, secondo una progressione geometrica, a partire dalla zona centrale dove è collocato il giacimento (Fig. 2.11). Il *grid* del modello a scala regionale risulta complessivamente costituito da $99_i \times 113_j$ celle in direzione areale.

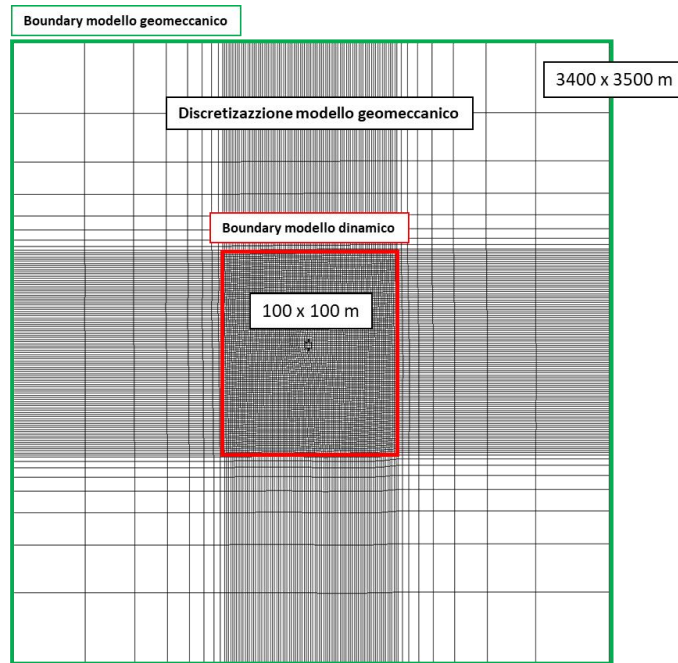


Fig. 2.11: Dimensioni e discretizzazione areale del modello geologico 3D a scala regionale; il rettangolo rosso identifica la zona dove è ubicato il giacimento di Gradizza, comprendente il culmine mineralizzato e l'acquifera laterale in comunicazione idraulica che delimita il giacimento.

In direzione verticale la zonazione del modello è stata realizzata a partire dalle superfici regionali e dalla ricostruzione della stratigrafia definita attraverso la correlazione ai pozzi. La zonazione è stata quindi resa più fitta definendo un *sub-layering* più fine nelle formazioni di giacimento e in quelle sommitali fino al piano campagna, ovvero nel volume maggiormente interessato dai fenomeni di compattazione e subsidenza; nei livelli basali, interessati da fenomeni marginali se non del tutto assenti, è stata adottata una discretizzazione più lasca. Complessivamente, sono stati definiti 23 *layer* (**Tab. 2.1**).

Il grigliato così definito risulta quindi costituito da un totale di 257'301 celle.

Tab. 2.1: Discretizzazione verticale del modello geologico 3D a scala regionale.

ZONA DI MODELLO	LAYER NUMERICI	SPESSORE MEDIO PER LAYER (m)
Alluvioni	1-2	50, 86
Sabbie di Asti sup.	3-4-5-6-7-8	269, 179, 119, 80, 53, 35
Caprock superiore	9	3
Reservoir Superiore	10	3
Caprock principale	11	6
Reservoir Principale	12-13	5, 5
Sabbie di Asti inf.	14-15-16	56, 154, 425
Argille del Santerno	17	176
Torbiditi plioceniche	18	55
Gessi	19	32
Marne sabbiose	20-21	571, 857
Calcarei e dolomie	22-23	542, 813



2.4 3D grid del modello statico di giacimento

Il modello statico di dettaglio del giacimento di Gradizza è stato sviluppato, ai fini della successiva modellizzazione fluidodinamica, prendendo come riferimento il modello statico 3D realizzato e fornito da Aleanna Italia (Aleanna Italia S.p.A., 2023). Il modello statico di dettaglio del giacimento rappresenta la porzione centrale del modello statico esteso a scala regionale (rettangolo rosso in Fig. 2.11), con dimensione areale delle celle pari a 100 m x 100 m. In Fig. 2.12 sono mostrate la geometria ed estensione del modello statico di riferimento fornito da Aleanna Italia e una vista 3D del modello statico di giacimento ricostruito all'interno del modello geologico esteso a scala regionale.

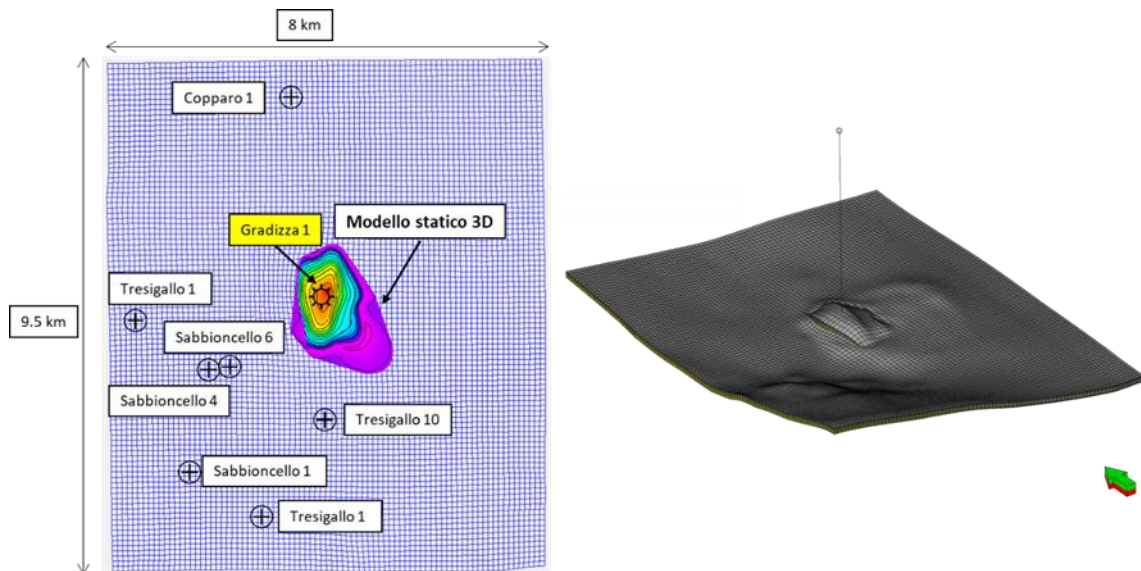


Fig. 2.12: Geometria ed estensione del modello statico di riferimento fornito da Aleanna Italia (sinistra) e vista 3D del modello statico di giacimento ricostruito all'interno del modello geologico esteso a scala regionale (destra).

Dopo aver definito la discretizzazione areale e verticale del modello statico di giacimento, comprendente dall'alto al basso stratigrafico i livelli *Caprock* superiore, Livello Superiore, *Caprock* principale e Livello Principale, i livelli mineralizzati sono stati popolati con i valori petrofisici (porosità, NTG, $S_{w,i}$) provenienti dallo studio condotto da Aleanna Italia (Aleanna Italia S.p.A., 2023). In Tab. 2.2 sono riportati i valori petrofisici utilizzati per i due livelli mineralizzati del giacimento di Gradizza (Livello Superiore e Livello Principale).

Tab. 2.2: Valori petrofisici associati ai livelli mineralizzati del giacimento di Gradizza.

Livello	Porosità (Φ)	Net to Gross (NTG)	Saturazione in acqua irriducibile ($S_{w,i}$)
Livello Superiore	0.28	0.40	0.45
Livello Principale	0.28	0.80	0.45



Sulla base delle assunzioni effettuate da Aleanna Italia (Aleanna Italia S.p.A., 2023), i contatti originari gas-acqua (GWC_i) nello scenario di sviluppo base ("GWC_basecase") sono stati definiti per i due livelli mineralizzati alle seguenti profondità:

- Livello Superiore: $GWC_i = 885$ m TVDss
- Livello Principale: $GWC_i = 898$ m TVDss.

Per il calcolo dei volumi statici, è stato assunto un valore iniziale del fattore di volume del gas ($B_{g,i}$) uniforme e pari a 0.0107643 m^3/m^3_{sc} per entrambi i livelli.

Sulla base dei calcoli volumetrici effettuati il volume di gas originariamente in posto (GOIP) risulta pari a $37.8 \cdot 10^6$ m_{sc}^3 per il Livello Superiore e a $208.5 \cdot 10^6$ m_{sc}^3 per il Livello Principale. Questi risultati sono del tutto in linea con le stime volumetriche effettuate da Aleanna Italia, come mostrato in **Tab. 2.3**. I volumi definiti nel modello statico di dettaglio del giacimento (GOIP statici) sono evidenziati in grassetto nella tabella.

Tab. 2.3: Volumi di gas originariamente in posto (GOIP) del modello statico di giacimento e confronto con le stime volumetriche effettuate da Aleanna Italia.

Livello	GOIP (modello Aleanna Italia) [$10^6 \cdot m_{sc}^3$]	GOIP (modello statico di giacimento) [$10^6 \cdot m_{sc}^3$]
Livello Superiore	38.5	37.8
Livello Principale	208.4	208.5
TOTALE CAMPO	246.9	246.4

Per valutare il comportamento geomeccanico del sistema è essenziale utilizzare un modello di acquifero di tipo volumetrico, in modo da poter analizzare l'evoluzione delle variazioni di pressione anche all'interno della parte di roccia serbatoio occupata dall'acquifero nell'area circostante la zona mineralizzata.

In mancanza di elementi strutturali a scala regionale che coinvolgano i livelli del serbatoio, in fase di modellizzazione statica è stata definita una estensione realistica dell'acquifero laterale che delimita la zona di culmine mineralizzata a gas. Si fa notare che, pur avendo stabilito una ragionevole correlazione dell'intervallo di sabbie mineralizzate a gas tra il pozzo Gradizza 1 e i pozzi limitrofi, permangono incertezze riguardo l'estensione dell'acquifero laterale e il suo livello di comunicazione idraulica con il culmine mineralizzato a gas, specialmente in relazione alle complessità stratigrafiche associate a un sistema deposizionale di canali e lobi come quello in esame.



La definizione dell'estensione dell'acquifero laterale in comunicazione idraulica con il culmine mineralizzato di Gradizza è basata sull'analisi dei risultati della recente interpretazione sismica che suggerisce una possibile chiusura (*pinch-out*) dei livelli del giacimento verso est, e sulle indicazioni circa la variazione dello spessore del Livello Principale derivanti dai dati associati ai pozzi limitrofi (dati disponibili nei registri pubblici, nei limiti della loro risoluzione). Tale analisi, fortemente dipendente alla quantità e qualità di dati a disposizione, ha consentito di definire in tutte le direzioni i limiti stratigrafici e/o sismici di chiusura dei livelli Principale e Superiore, come mostrato in **Fig. 2.13**. In particolare, l'interfaccia tra la zona blu e quella azzurra in figura rappresenta una barriera di flusso e, conseguentemente, il limite esterno dell'acquifero laterale che delimita il giacimento. La porzione esterna a tale limite, non in comunicazione idraulica con la zona mineralizzata e l'acquifero laterale, è stata disattivata in sede di simulazione fluidodinamica.

La forma dell'acquifero laterale che delimita il culmine mineralizzato richiama l'ambiente deposizionale marino *intra-slope*, caratterizzato dalla presenza di canali e lobi prossimali e distali, orientati principalmente da NO a SE, e risulta in sintonia con la direzione ed il tipo di elementi che si sono depositi nell'area di interesse durante il Pleistocene, come documentato da Ghielmi et al. (2010).

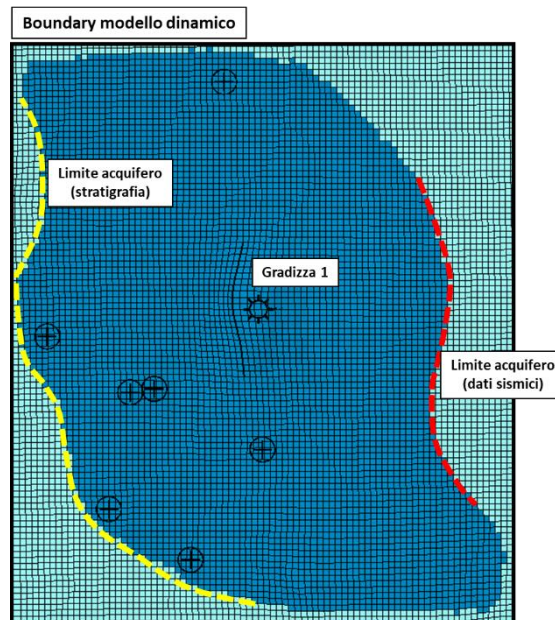


Fig. 2.13: Geometria ed estensione dell'acquifero laterale in comunicazione idraulica con il culmine mineralizzato di Gradizza (area blu); l'interfaccia tra la zona blu e quella azzurra rappresenta una barriera di flusso e, conseguentemente, il limite esterno dell'acquifero laterale che delimita il giacimento.



3 MODELLO DINAMICO DI GIACIMENTO

L'aggiornamento del modello geomeccanico del campo di Gradizza ha richiesto la revisione del modello dinamico originariamente definito (Dream s.r.l., 2015). In particolare, per descrivere il comportamento fluidodinamico del giacimento di Gradizza è stato messo a punto un nuovo modello numerico 3D di flusso tramite l'utilizzo del *software* commerciale Eclipse 100 (Schlumberger TM).

Il nuovo modello è stato definito sulla base del modello statico di giacimento aggiornato, comprendente sia il livello Principale sia il soprastante livello Superiore, ed è stato popolato e inizializzato sulla base dei dati forniti da Aleanna Italia.

Il modello dinamico implementa il nuovo scenario di produzione stimato da Aleanna Italia (produzione in *commingle* dei livelli Principale e Superiore attraverso completamento singolo nel pozzo Gradizza 1) e riportato nella comunicazione effettuata da Aleanna Italia al Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica in data 14 marzo 2023: "Istanza di concessione di coltivazione di idrocarburi liquidi e gassosi a terra denominata "Gradizza". Integrazione dell'istruttoria finalizzata al conferimento del titolo minerario. Richiesta di aggiornamento del modello statico di giacimento, delle previsioni di produzione e della valutazione economica del progetto" (Aleanna Italia S.p.A., 2023).

La simulazione dinamica del nuovo scenario di produzione previsto per il recupero delle riserve di gas ha interessato soltanto la porzione centrale del modello statico esteso, corrispondente al culmine mineralizzato e all'acquifero laterale che delimita il giacimento. La porzione restante del modello esteso, non in comunicazione idraulica con l'area mineralizzata, è stata disattivata in sede di simulazione fluidodinamica.

Con riferimento a quanto già descritto nel **paragrafo §2.4**, ai fini della valutazione del comportamento geomeccanico è necessario ricorrere ad una modellizzazione dell'acquifero di tipo volumetrico in modo da poter determinare la propagazione spaziale e l'evoluzione temporale del disturbo di pressione anche nella porzione di roccia serbatoio occupata dall'acquifero che delimita il giacimento. Pertanto, il modello dinamico è stato definito in modo da includere nel volume simulato anche l'acquifero laterale che delimita il culmine mineralizzato.



Il dettaglio delle attività tecniche eseguite per la costruzione del modello dinamico e la simulazione dello scenario previsionale per il recupero delle riserve di gas è riportato nel seguito:

- aggiornamento del modello dinamico precedentemente realizzato (Dream s.r.l., 2015) sulla base del modello statico aggiornato e dei dati più recenti forniti da Aleanna Italia;
- implementazione del nuovo scenario di produzione stimato da Aleanna Italia (produzione in *commingle* dei livelli Principale e Superiore attraverso completamento singolo nel pozzo Gradizza 1);
- simulazione del nuovo profilo di produzione e di un adeguato periodo di monitoraggio successivo alla fine della produzione;
- esportazione delle mappe di pressione simulate in corrispondenza dei *time-step* più significativi individuati per le successive analisi geomeccaniche.

3.1 Estensione del modello dinamico e discretizzazione (grid)

L'estensione complessiva del modello dinamico, comprensivo del culmine mineralizzato e dell'acquifero laterale che delimita il giacimento, è stata definita sulla base della valutazione dedicata effettuata in fase di modellizzazione statica (**paragrafo §2.4**), che ha consentito di indentificare in tutte le direzioni i limiti stratigrafici e/o sismici di chiusura dei livelli Principale e Superiore. Come già discusso, l'interfaccia tra la zona blu e quella azzurra in **Fig. 2.13** rappresenta il limite esterno dell'acquifero laterale che delimita il giacimento. La porzione esterna a tale limite, non in comunicazione idraulica con la zona mineralizzata e l'acquifero laterale, è stata disattivata in sede di simulazione fluidodinamica. Ai fini della successiva modellizzazione geomeccanica tale area è stata ipotizzata totalmente satura in acqua e popolata con valori di pressione idrostatica costanti nel tempo.

Si fa notare che la geometria e l'estensione totale del modello dinamico sono del tutto comparabili con quelle del modello dinamico realizzato nel precedente studio geomeccanico (Dream s.r.l., 2015).



Il *grid* del modello dinamico è stato definito nella fase di modellizzazione statica e successivamente esportato ai fini della modellizzazione dinamica. Esso rappresenta solo una porzione, sia in direzione areale che in direzione verticale, del grid geologico esteso definito nella fase di modellizzazione statica (**paragrafo §2.4**).

Il numero di celle totali (i, j, k) del modello dinamico è pari a 83 x 97 x 5 (40'255 celle), mentre le celle attive sono 17'299. Le dimensioni medie delle celle (i, j, k) risultano pari a 100 m x 100 m x 4.2 m.

La **Fig. 3.1** riporta una vista in pianta del modello dinamico con la distribuzione dei valori di profondità delle celle. L'ubicazione del pozzo Gradizza 1 nel culmine mineralizzato è chiaramente visibile al centro dell'area modellizzata.

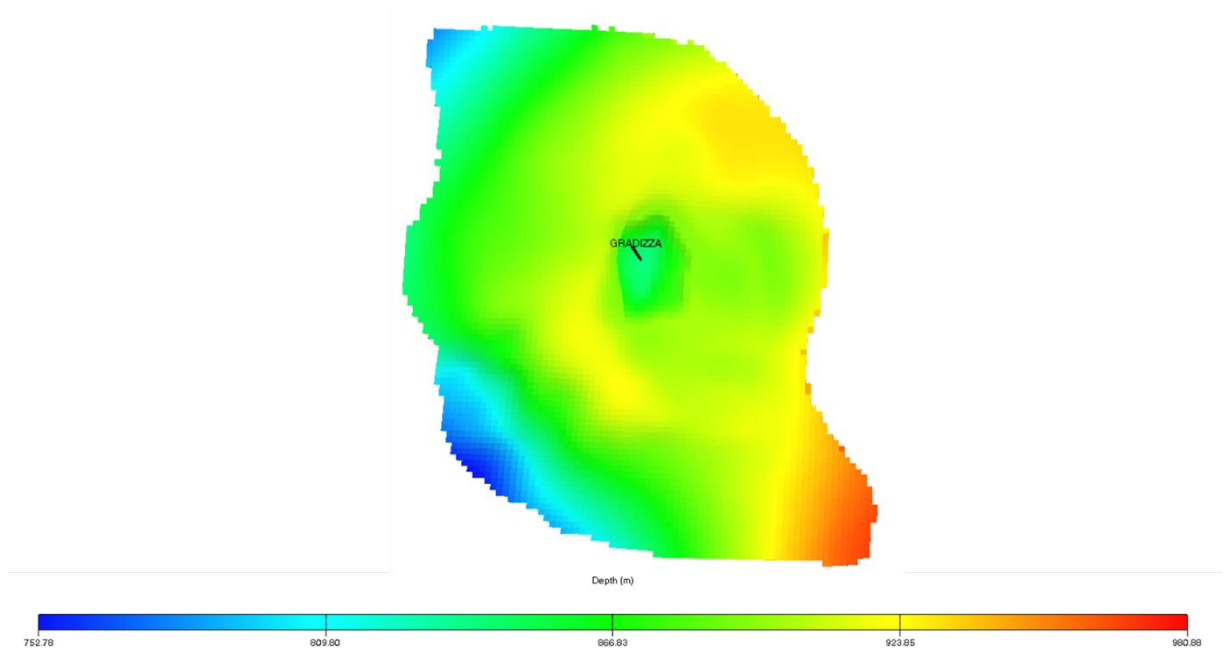


Fig. 3.1: Vista in pianta del modello dinamico con la distribuzione dei valori di profondità delle celle e l'ubicazione del pozzo Gradizza 1.



La **Tab. 3.1** riporta uno schema con l'indicazione dei *layer* con cui sono stati discretizzati i vari livelli del giacimento, dall'alto verso il basso: *Caprock* superiore, Livello Superiore, *Caprock* principale e Livello Principale. La *Caprock* superiore e la *Caprock* principale (*layer* 1 e *layer* 3) sono state disattivate in sede di simulazione fluidodinamica in quanto non in comunicazione idraulica con i livelli mineralizzati. La **Fig. 3.2** mostra una vista in sezione verticale del modello dinamico con l'individuazione dei due livelli mineralizzati (Superiore e Principale) e il *layering* adottato.

La discretizzazione verticale implementata ha consentito di riprodurre la sequenza stratigrafica del giacimento, ma anche di definire in modo opportuno i completamenti del pozzo Gradizza 1, tenendo conto dell'intervallo produttivo del pozzo nel livello Principale.

Tab. 3.1: Discretizzazione verticale (*layering*) adottata nel modello dinamico.

Livello	Layer
<i>Caprock</i> superiore	1
Livello Superiore	2
<i>Caprock</i> principale	3
Livello Principale	4-5

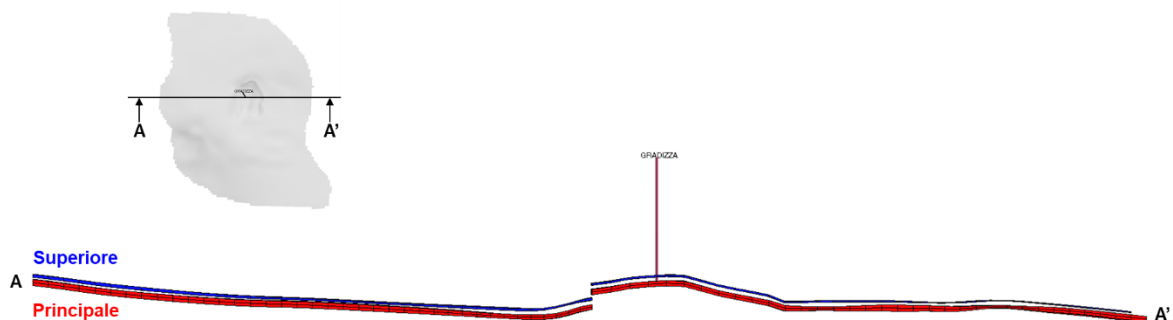


Fig. 3.2: Vista in sezione verticale del modello dinamico con l'individuazione dei due livelli mineralizzati (Superiore e Principale) e il *layering* adottato.



3.2 Caratterizzazione petrofisica

Le distribuzioni delle proprietà petrofisiche (porosità, NTG, $S_{w,i}$) definite nella fase di modellizzazione statica del giacimento (**paragrafo §2.4**) sono state esportate e implementate nel modello dinamico.

Un valore di permeabilità assoluta orizzontale pari a 6 mD è stato assegnato uniformemente in tutte le celle attive del modello dinamico appartenenti ai livelli mineralizzati sulla base dei risultati dell'interpretazione delle due prove di produzione (*well test*) condotte al pozzo Gradizza 1 nel Livello Principale a settembre e a novembre 2013 (NorthSun Italia S.p.A., 2014). Le due prove, condotte rispettivamente subito dopo il completamento del pozzo e due mesi dopo il rilascio dell'impianto, avevano evidenziato valori di permeabilità compresi tra 5.4 e 6.0 mD.

Considerata la natura litologica del mezzo poroso in esame, si è assunto che il sistema sia anisotropo in direzione verticale, con rapporto di anisotropia (k_v/k_h) pari a 0.1, in analogia con litologie simili (sabbie e sabbie argillose di ambiente marino risalenti al Pleistocene)..

Dal punto di vista delle trasmissività areali, all'interno dell'area di estensione del modello dinamico è presente un'unica faglia, considerata totalmente *sealing* (trasmissività nulla), che delimita la zona mineralizzata verso ovest. Come descritto nel **paragrafo §2.2.2**, tale faglia coincide con il margine occidentale del canale che si estende verso est con lieve pendenza.

La faglia è stata implementata nel modello dinamico come barriera a trasmissività nulla (**Fig. 3.3**). La presenza della faglia influisce ovviamente sulla propagazione verso ovest del disturbo di pressione indotto dalla produzione di gas del pozzo Gradizza 1.



Fig. 3.3: Vista in pianta del modello dinamico con l'ubicazione della faglia a trasmissività nulla che delimita la zona mineralizzata verso ovest.



3.3 Proprietà dei fluidi e di interazione roccia-fluidi

Le proprietà PVT del gas (fattore di volume, B_g e viscosità, μ_g) implementate nel modello dinamico sono state calcolate sulla base della composizione del gas risultante dalle analisi effettuate e del valore della temperatura di giacimento ($T = 33.7^\circ\text{C}$).

L'andamento del fattore di volume e della viscosità del gas in funzione della pressione è mostrato graficamente rispettivamente in **Fig.3.4** e in **Fig.3.5**.

Le curve di permeabilità relativa implementate nel modello dinamico sono state definite per analogia con litologie simili e giacimenti limitrofi. Le pressioni capillari sono state considerate trascurabili e pertanto non implementate all'interno del modello dinamico.

Le curve di permeabilità relativa all'acqua e al gas adottate nel modello dinamico sono rappresentate graficamente in **Fig.3.6**.

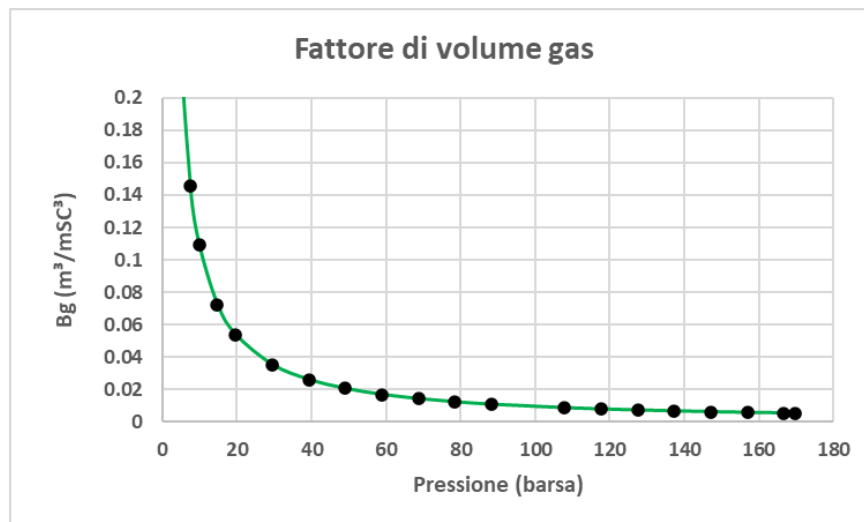


Fig. 3.4: Andamento in funzione della pressione del fattore di volume del gas (B_g).

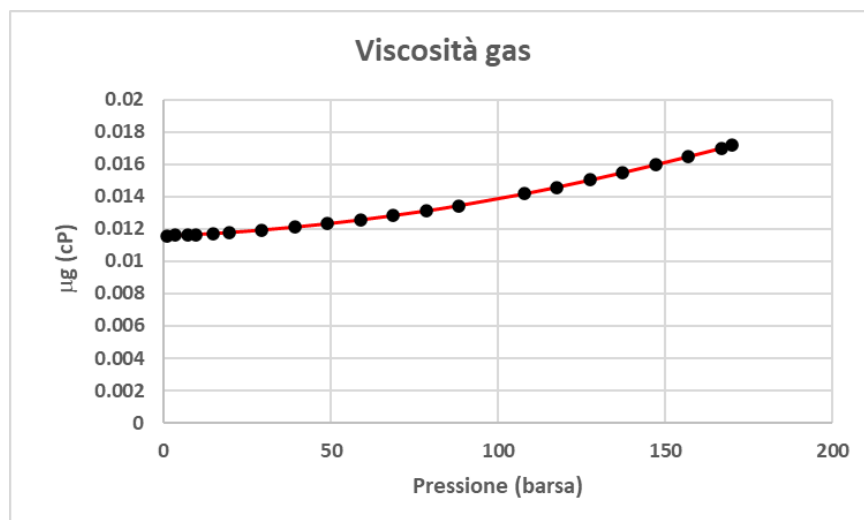


Fig. 3.5: Andamento in funzione della pressione della viscosità del gas (μ_g).

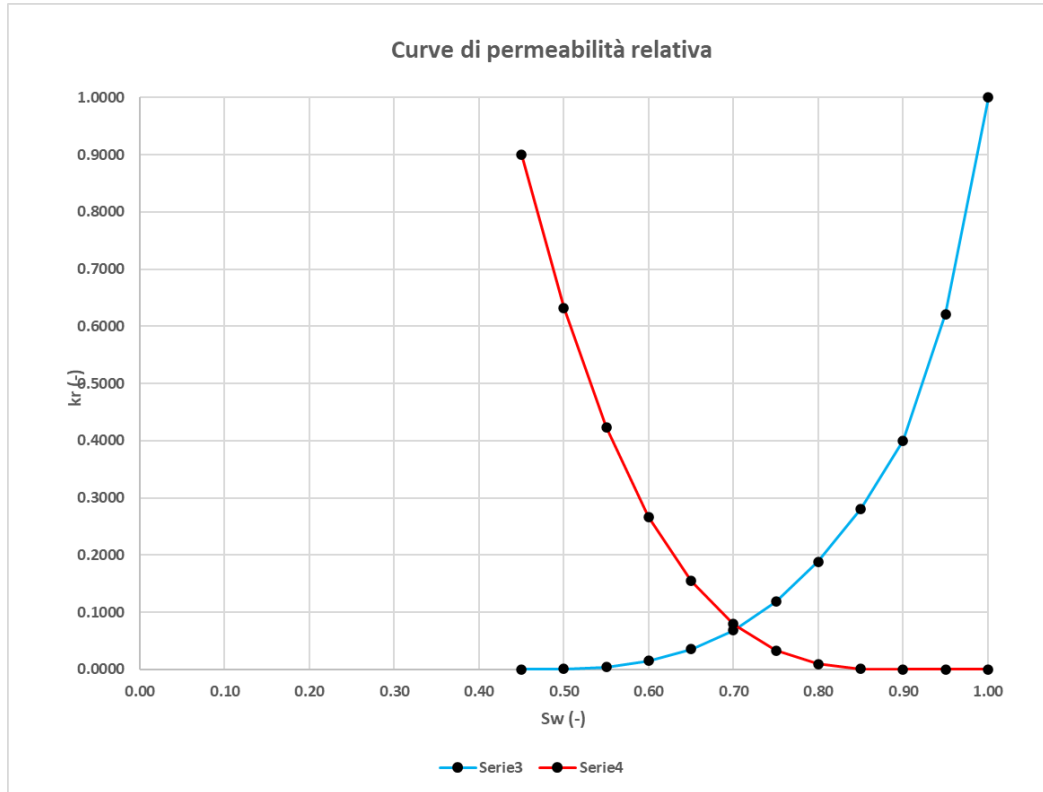


Fig. 3.6: Curve di permeabilità relativa all'acqua ($k_{r,w}$) e al gas ($k_{r,g}$).

3.4 Inizializzazione e volumi

Il modello dinamico del campo di Gradizza è stato inizializzato definendo la distribuzione iniziale dei valori di pressione e saturazione per ciascuno dei due livelli mineralizzati, Superiore e Principale.

La pressione iniziale del Livello Principale è stata misurata dopo la fase di perforazione e completamento del pozzo e risulta pari a 87.41 barsa (89.13 kg/cm^2_a), alla profondità di riferimento (*datum*) di 850.5 m TVDss.

In mancanza di misurazioni dirette, la pressione iniziale del Livello Superiore è stata calcolata a partire da quella del Livello Principale, assumendo che i due livelli mineralizzati siano caratterizzati dalla presenza di una comune pressione idrostatica (**Fig. 3.7**). Sulla base di tale valutazione, la pressione iniziale del Livello Superiore risulta pari a 85.68 barsa (87.37 kg/cm^2_a), alla profondità di riferimento (*datum*) di 850.5 m TVDss.

I contatti originari gas-acqua (GWC_i) dei due livelli mineralizzati adottati nel modello dinamico sono gli stessi considerati nella fase di modellizzazione statica del giacimento (**paragrafo §2.4**).

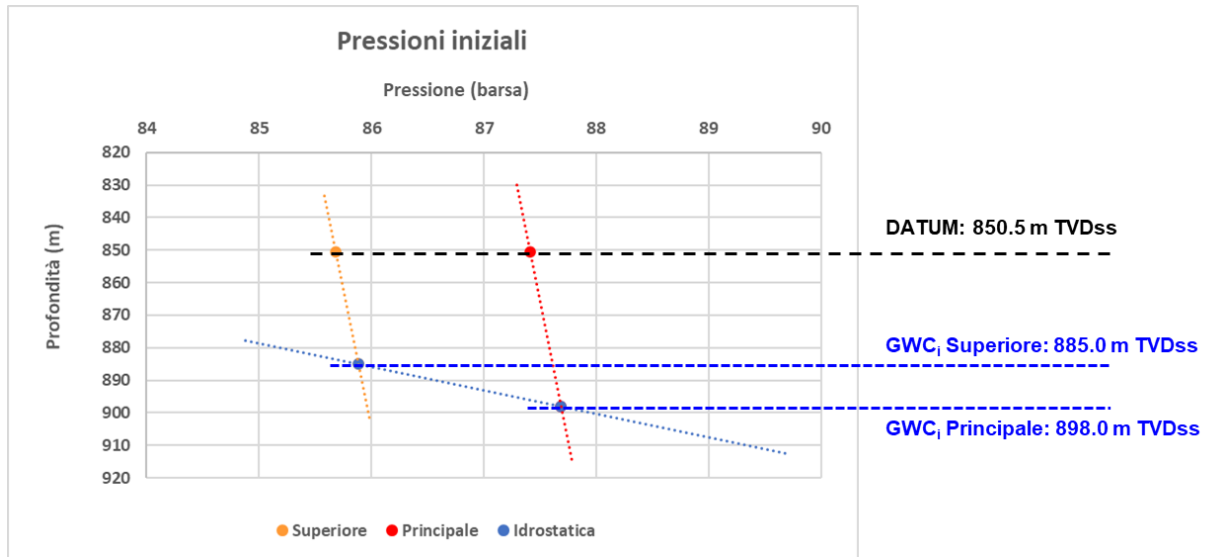


Fig. 3.7: Pressione iniziale dei due livelli mineralizzati (Superiore e Principale) nell'ipotesi che i due livelli siano caratterizzati dalla presenza di una comune pressione idrostatica.

La **Tab. 3.2** riporta un riassunto dei parametri di inizializzazione impiegati per ciascuno dei due livelli mineralizzati (contatto gas-acqua originario e pressione iniziale).

Tab. 3.2 – Parametri di inizializzazione del modello dinamico.

Livello	GWC _i [m TVDss]	p _i @datum [kg/cm ² _a]	p _i @datum [barsa]
Livello Superiore	885.0	87.37	85.68
Livello Principale	898.0	89.13	87.41

A seguito dell'inizializzazione del modello dinamico, è stato possibile determinare il volume di gas originariamente in posto (GOIP) per ciascuno dei due livelli mineralizzati.

La **Tab. 3.3** riassume i volumi di gas ottenuti per ciascun livello e per l'intero campo e riporta il confronto con le corrispondenti stime del modello statico di giacimento (**paragrafo §2.4**). I volumi definiti nel modello dinamico (GOIP dinamici) sono evidenziati in grassetto nella tabella.

Si precisa che le stime di GOIP statico sono state effettuate assumendo un valore iniziale del fattore di volume del gas ($B_{g,i}$) uniforme e pari a $0.0107643 \text{ m}^3/\text{m}^3_{SC}$, mentre nel modello dinamico il valore di $B_{g,i}$ è calcolato in modo più rigoroso sulla base della profondità, e dunque della pressione iniziale, di ciascuna cella. In particolare, la lieve differenza (-2.4%) tra la stima statica e dinamica del GOIP del Livello Superiore deriva dal fatto che tale livello è caratterizzato, in virtù dell'ipotesi di pressione idrostatica comune, da una pressione iniziale più bassa rispetto a quella del Livello Principale e dunque da un valore medio più alto del fattore di volume del gas ($B_{g,i}$).



Tab. 3.3 – Valori di GOIP dinamico e confronto con i corrispondenti volumi statici.

Livello	GOIP statico [$10^6 \cdot m_{sc}^3$]	GOIP dinamico [$10^6 \cdot m_{sc}^3$]
Livello Superiore	37.8	36.9
Livello Principale	208.5	208.5
TOTALE CAMPO	246.4	245.4

Le distribuzioni dei valori iniziali di pressione e saturazione in gas nel modello dinamico una volta inizializzato sono riportate in pianta nella Fig. 3.8 (pressione iniziale) e nella Fig. 3.9 (saturazione in gas iniziale).

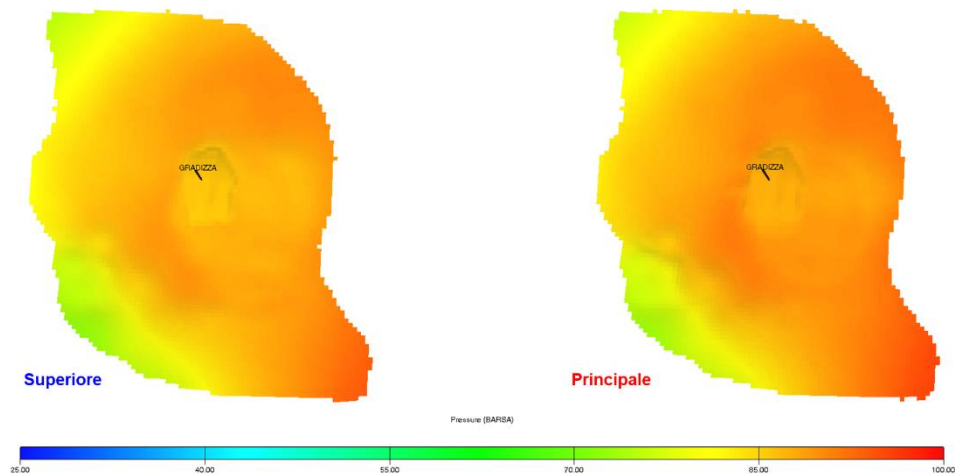


Fig. 3.8: Vista in pianta del modello dinamico con la distribuzione dei valori iniziali di pressione espressi in barba per il Livello Superiore (sinistra) e per il Livello Principale (destra).

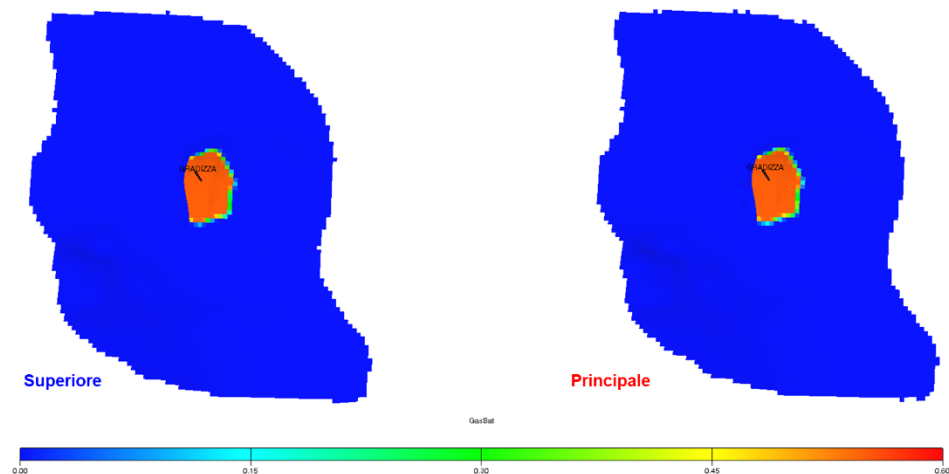


Fig. 3.9: Vista in pianta del modello dinamico con la distribuzione dei valori iniziali di saturazione in gas per il Livello Superiore (sinistra) e per il Livello Principale (destra).



3.5 Scenario di sviluppo per il recupero delle riserve di gas

Il nuovo scenario di sviluppo per il recupero delle riserve di gas previsto da Aleanna Italia considera la messa in produzione del campo tramite il pozzo esistente Gradizza 1, equipaggiato con completamento singolo, e produzione in *commingle* dei livelli Principale e Superiore. In particolare, il nuovo profilo con le portate di produzione di gas e i relativi volumi prodotti è stato stimato da Aleanna Italia (Aleanna Italia S.p.A., 2023) per mezzo della seguente equazione di flusso per il pozzo Gradizza 1:

$$Q_g = 11.25 \cdot (P_s^2 - P_f^2)^{1/2} \quad (3.1)$$

dove:

Q_g : portata di produzione di gas [m_{sc}^3/g]

P_s : pressione statica a fondo pozzo [kg/cm^2_a]

P_f : pressione dinamica a fondo pozzo [kg/cm^2_a]

La **Tab. 3.4** riporta i dati relativi al profilo di produzione stimato da Aleanna Italia per il periodo di coltivazione considerato (35 anni, con pressione di abbandono in giacimento pari a $35 kg/cm^2_a$). Il profilo di produzione stimato prevede un Δp massimo a fondo pozzo pari al 20% e un *down time* del 2% del pozzo durante la fase di erogazione.

Lo scenario di sviluppo stimato da Aleanna Italia è stato implementato nel modello dinamico per verificarne la fattibilità e determinare l'evoluzione spaziale e temporale di pressioni e saturazioni in tutto il dominio di simulazione.

In particolare, il pozzo Gradizza 1 è stato aperto alla produzione in *commingle* nel *layer 2* (intero spessore mineralizzato del Livello Superiore) e nel *layer 4* (porzione sommitale dell'intervallo mineralizzato del Livello Principale). Le portate giornaliere di gas stimate da Aleanna Italia sono state imposte al pozzo in fase di simulazione fluidodinamica (*input*), assumendo un periodo di *down time* del 2%. Il profilo di pressione statica simulato a fondo pozzo è stato poi confrontato con l'analogo profilo stimato da Aleanna Italia sulla base dell'**equazione (3.1)**.

Il confronto tra il profilo di produzione simulato con il modello dinamico e quello stimato da Aleanna Italia tramite equazione di flusso è riportato in **Fig. 3.10** (portate giornaliere di produzione di gas) e in **Fig. 3.11** (produzione cumulativa di gas). Vista l'imposizione delle portate di gas come *input* in fase di simulazione, i due profili di produzione coincidono perfettamente, così come la stima delle riserve di gas producibili nell'intervallo di tempo considerato. In particolare, il valore delle riserve di gas producibili in 35 anni risulta pari a $161.9 \cdot 10^6 m_{sc}^3$.



Tab. 3.4 – Dati relativi al profilo di produzione stimato da Aleanna Italia per il periodo di sviluppo considerato (35 anni, con pressione di abbandono in giacimento pari a 35 kg/cm²_a).

Anno	Ps	Pf ($\Delta p = 20\%$)	FTHP	Qg (20%)	Gp _{anno}	Gp _{cum}	GIP	Ps/z	RF
	Kg/cm ² _a	Kg/cm ² _a	Kg/cm ² _a	Stm ³ /g	10 ⁶ Stm ³	10 ⁶ Stm ³	10 ⁶ Stm ³	Kg/cm ² _a	%
1	89.13	71.30	62.43	32,174	11.509	11.509	234.991	97.69	4.7
2	85.44	68.35	60.22	29,565	10.575	22.084	224.416	93.33	9.0
3	82.05	65.64	58.15	27,265	9.753	31.837	214.663	89.32	12.9
4	78.89	63.11	56.19	25,206	9.016	40.853	205.647	85.61	16.6
5	75.95	60.76	54.33	23,362	8.357	49.209	197.291	82.18	20.0
6	73.21	58.57	52.57	21,707	7.765	56.974	189.526	78.98	23.1
7	70.64	56.51	50.91	20,210	7.229	64.203	182.297	76.01	26.0
8	68.24	54.59	49.33	18,860	6.746	70.949	175.551	73.23	28.8
9	65.98	52.78	47.84	17,631	6.307	77.256	169.244	70.64	31.3
10	63.86	51.09	46.43	16,516	5.908	83.164	163.336	68.21	33.7
11	61.86	49.49	45.08	15,498	5.544	88.707	157.793	65.93	36.0
12	59.97	47.98	43.81	14,565	5.210	93.917	152.583	63.78	38.1
13	58.19	46.55	42.59	13,714	4.905	98.823	147.677	61.76	40.1
14	56.50	45.20	41.43	12,929	4.625	103.447	143.053	59.86	42.0
15	54.90	43.92	40.32	12,207	4.366	107.814	138.686	58.07	43.7
16	53.39	42.71	39.28	11,544	4.129	111.943	134.557	56.37	45.4
17	51.95	41.56	38.27	10,930	3.910	115.853	130.647	54.76	47.0
18	50.58	40.46	37.31	10,361	3.706	119.559	126.941	53.23	48.5
19	49.28	39.42	36.40	9,835	3.518	123.077	123.423	51.79	49.9
20	48.04	38.43	35.53	9,347	3.343	126.420	120.080	50.41	51.3
21	46.85	37.48	34.68	8,889	3.180	129.600	116.900	49.10	52.6
22	45.72	36.58	33.88	8,466	3.028	132.628	113.872	47.86	53.8
23	44.64	35.71	33.11	8,071	2.887	135.515	110.985	46.67	55.0
24	43.60	34.88	32.37	7,699	2.754	138.269	108.231	45.54	56.1
25	42.62	34.10	31.66	7,357	2.631	140.901	105.599	44.45	57.2
26	41.67	33.34	30.99	7,032	2.515	143.416	103.084	43.42	58.2
27	40.76	32.61	30.33	6,729	2.407	145.823	100.677	42.43	59.2
28	39.89	31.91	29.71	6,444	2.305	148.128	98.372	41.48	60.1
29	39.05	31.24	29.09	6,176	2.209	150.337	96.163	40.57	61.0
30	38.25	30.60	28.52	5,925	2.120	152.457	94.043	39.70	61.8
31	37.47	29.98	27.95	5,686	2.034	154.491	92.009	38.86	62.7
32	36.73	29.38	27.41	5,464	1.954	156.445	90.055	38.06	63.5
33	36.01	28.81	26.89	5,252	1.879	158.324	88.176	37.29	64.2
34	35.32	28.26	26.39	5,052	1.807	160.131	86.369	36.54	65.0
35	35.00	28.00	26.16	4,961	1.775	161.905	84.595	35.81	65.7

Il confronto tra il profilo di pressione statica a fondo pozzo simulato con il modello dinamico e il corrispondente profilo stimato da Aleanna Italia tramite l'equazione (3.1) è riportato in Fig. 3.12. Il confronto evidenzia un ottimo accordo tra i due profili. Le limitate differenze sono legate alle diverse metodologie di determinazione delle prestazioni del pozzo e alla descrizione più rigorosa delle condizioni reali in termini di geometria, effetti gravitativi e leggera influenza dell'acquifero laterale che possono essere tenuti in conto nella modellizzazione dinamica 3D. Il modello dinamico conferma, al termine dei 35 anni di produzione, una pressione di abbandono in giacimento pari a 35 kg/cm²_a, con un meccanismo di produzione rappresentato pressoché integralmente dall'espansione del gas.

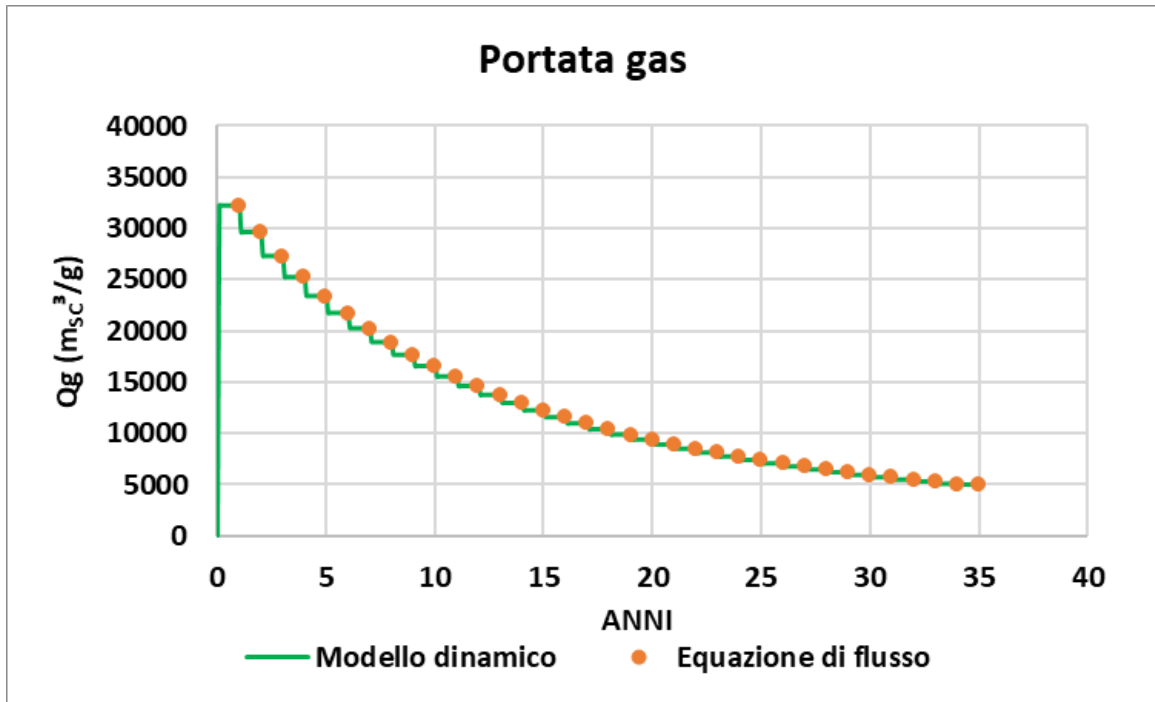


Fig. 3.10: Confronto tra profilo di produzione simulato con il modello dinamico (linea verde) e profilo stimato tramite equazione di flusso (punti arancioni) in termini di portate giornaliere di produzione di gas.

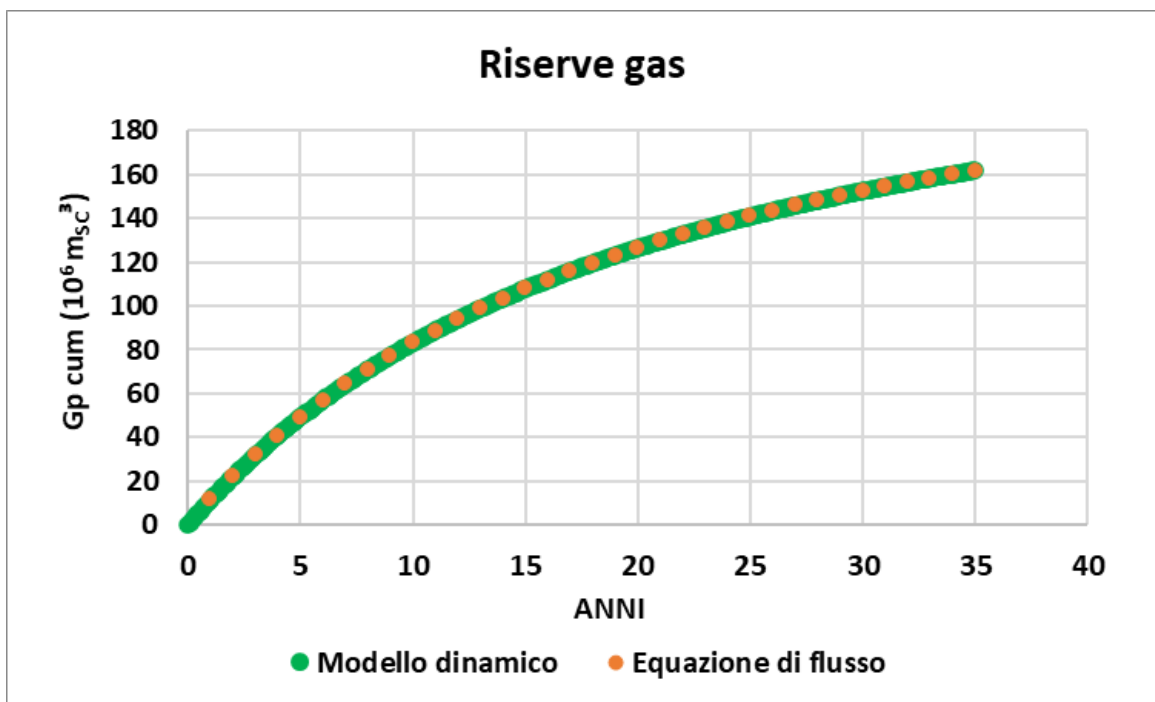


Fig. 3.11: Confronto tra profilo di produzione simulato con il modello dinamico (linea verde) e profilo stimato tramite equazione di flusso (punti arancioni) in termini di produzione cumulativa di gas.

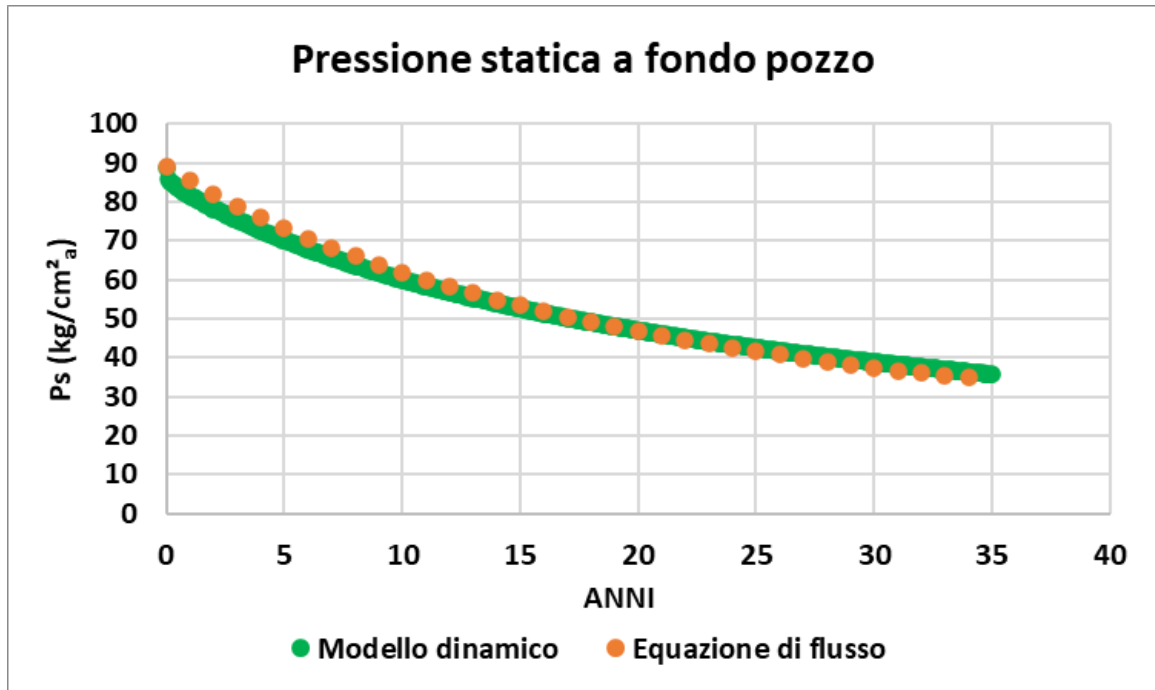


Fig. 3.12: Confronto tra profilo di pressione statica a fondo pozzo simulato con il modello dinamico (linea verde) e profilo stimato tramite equazione di flusso (punti arancioni).

Una volta terminata la fase di produzione, il comportamento dinamico del giacimento è stato simulato per ulteriori 40 anni (periodo di monitoraggio) al fine di verificare la risposta del sistema all'instaurarsi di nuove condizioni di equilibrio a campo chiuso (Fig. 3.13).

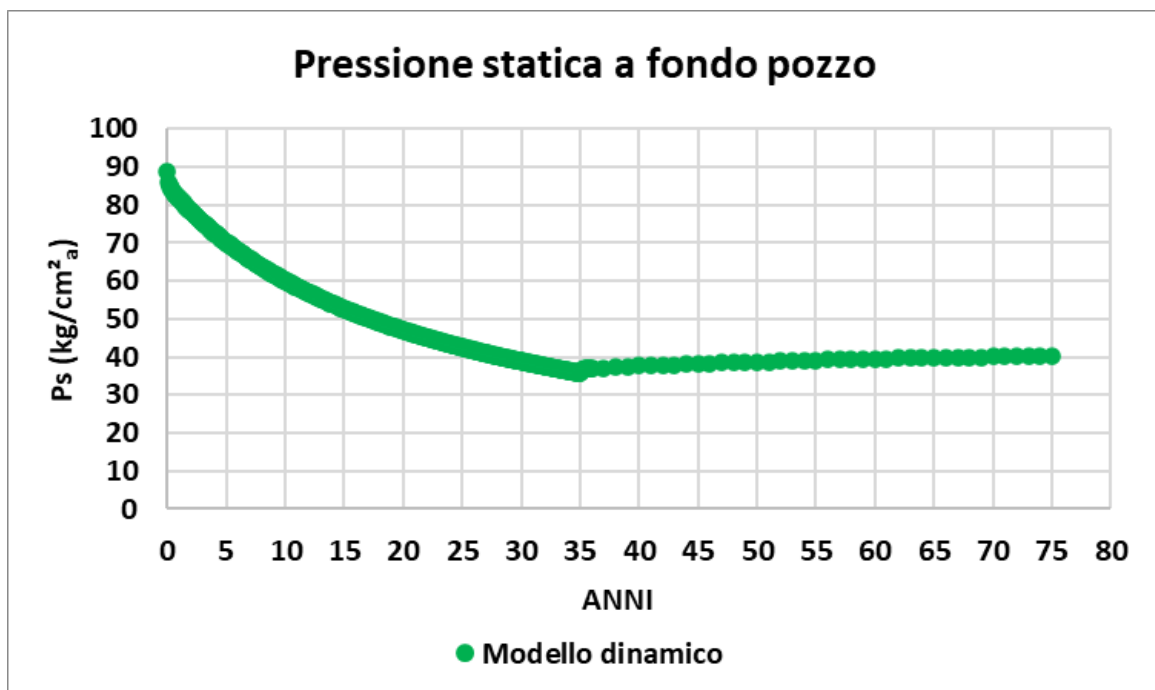


Fig. 3.13: Profilo completo di pressione statica a fondo pozzo simulato con il modello dinamico (linea verde) comprendente i 35 anni di erogazione e i successivi 40 anni di monitoraggio.



3.6 Mappe di pressione

Sulla base della simulazione effettuata con il modello dinamico e considerando l'estensione implementata per la modellizzazione volumetrica dell'acquifero, sono state quindi generate le mappe delle pressioni interstiziali in corrispondenza degli istanti temporali (*time-step*) più significativi per l'analisi del comportamento geomeccanico delle formazioni, come descritto nel successivo **paragrafo §4.4.2**.

A titolo di esempio, le distribuzioni dei valori di pressione interstiziale nel modello dinamico nelle condizioni iniziali (anno 0), al termine della fase di produzione di gas (anno 35) e alla fine dei 40 anni di monitoraggio (anno 75) sono riportate in pianta nella **Fig. 3.14** (Livello Superiore) e nella **Fig. 3.15** (Livello Principale).

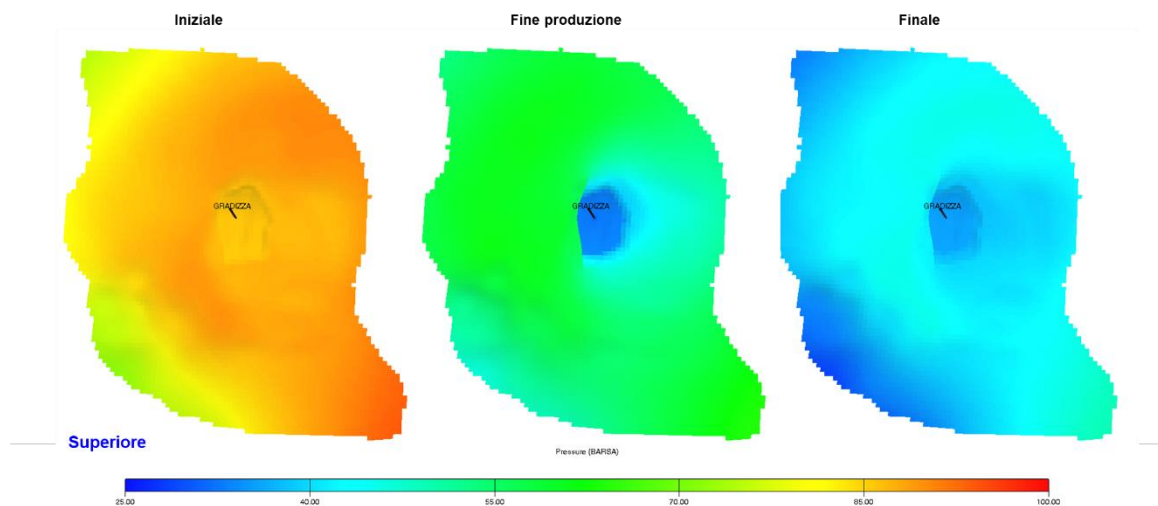


Fig. 3.14: Vista in pianta del modello dinamico con la distribuzione dei valori di pressione espressi in barsa per il Livello Superiore nelle condizioni iniziali (sinistra), al termine della fase di produzione di gas (centro) e alla fine dei 40 anni di monitoraggio (destra).

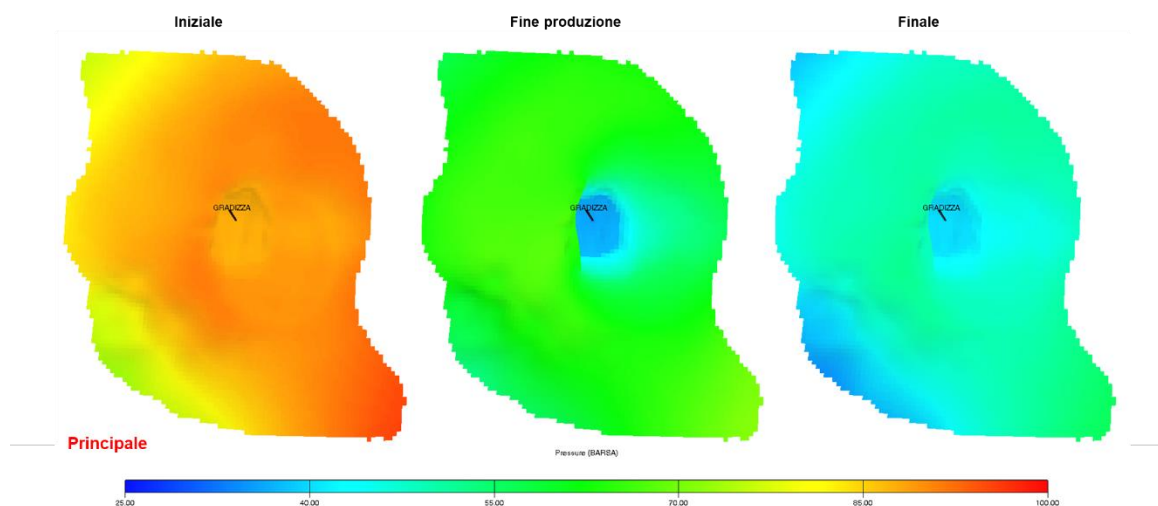


Fig. 3.15: Vista in pianta del modello dinamico con la distribuzione dei valori di pressione espressi in barsa per il Livello Principale nelle condizioni iniziali (sinistra), al termine della fase di produzione di gas (centro) e alla fine dei 40 anni di monitoraggio (destra).



4 STUDIO GEOMECCANICO

L'obiettivo dello studio geomeccanico è stato quello di valutare l'evoluzione dei campi degli sforzi, delle deformazioni e degli spostamenti indotti nel giacimento di Gradizza e nelle formazioni limitrofe dalla futura attività di produzione primaria del campo. A questo scopo è stata condotta una modellazione ad elementi finiti in campo tridimensionale con il codice di calcolo *Petrel Reservoir Geomechanics* (Schlumberger TM), previa caratterizzazione geomeccanica delle formazioni interessate dalla produzione nonché di tutta la sequenza stratigrafica sovrastante e sottostante.

La modellizzazione geomeccanica analizza il campo degli sforzi e delle deformazioni di un mezzo soggetto a variazioni di carico e a condizioni al contorno ed esamina gli sforzi indotti nel mezzo poroso in termini di sforzi efficaci, mentre i carichi sono rappresentati dalle variazioni degli sforzi efficaci indotte nella roccia serbatoio dalla diminuzione e/o dall'aumento della pressione interstiziale (incremento e/o diminuzione degli sforzi efficaci).

Per stimare la risposta in termini di deformabilità e resistenza delle formazioni interessate dalle operazioni di produzione è indispensabile poter disporre di una caratterizzazione geomeccanica appropriata del sistema. La caratterizzazione del giacimento e delle formazioni limitrofe è stata effettuata sulla base dei dati ottenuti dall'interpretazione dei *log* di pozzo disponibili e dei risultati dei test di laboratorio, integrati ed estesi alla scala del problema tramite informazioni reperite in letteratura ed esperienze pregresse su formazioni analoghe (Dream s.r.l., 2015).

La modellazione numerica dei fenomeni oggetto di studio ha richiesto la discretizzazione spaziale del volume di interesse secondo un reticolo sufficientemente fitto, particolarmente dettagliato nelle zone a maggior gradiente tensionale in modo tale da eliminare, o quantomeno minimizzare, eventuali problemi di convergenza numerica.

In fase di modellizzazione geomeccanica al mezzo discretizzato è stato attribuito lo stato tensionale iniziale. Il modello così inizializzato è stato quindi utilizzato per valutare la risposta del sistema in termini di variazioni altimetriche del piano campagna a seguito della futura messa in produzione del giacimento di Gradizza, con durata prevista pari a 35 anni, e durante i successivi 40 anni di monitoraggio dal termine delle operazioni di coltivazione.

I valori di subsidenza calcolati mediante la simulazione geomeccanica sono unicamente frutto della produzione di gas ipotizzata nel giacimento di Gradizza, mentre gli effetti imputabili sia ad attività antropiche di altra natura sia a processi geologici/strutturali a scala regionale, oltre ad eventuali effetti dovuti alla produzione dei giacimenti limitrofi, non sono stati tenuti in conto per l'impossibilità di quantificare tali fenomeni.



4.1 Descrizione del software Reservoir Geomechanics (Petrel)

Il modello geomeccanico è stato realizzato con il simulatore *Petrel Reservoir Geomechanics* (Schlumberger™). Il *software*, integrato nella piattaforma *Petrel*, è totalmente compatibile con i moduli *Petrel Geoscience* e *Petrel Reservoir Engineering* che consentono rispettivamente la costruzione del modello statico e la simulazione fluidodinamica.

Basandosi su un approccio ad elementi finiti (FEM), *Reservoir Geomechanics* consente di generare modelli numerici per analisi sia di tipo puramente geomeccanico sia di tipo accoppiato geomeccanico-fluidodinamico. Possono essere quindi effettuate analisi di tipo *iteratively coupling* o analisi di tipo *one-way coupling* (Fig. 4.1).

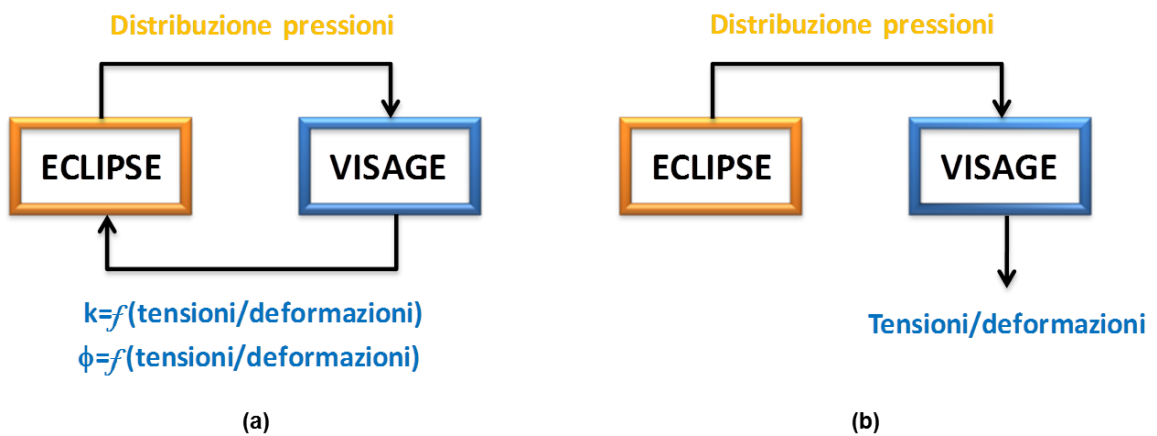


Fig. 4.1: Schema esplicativo per l'approccio *iteratively coupling* (a) e *one-way coupling* (b).

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



4.2 *Definizione del modello*

4.2.1 *Grid*

Il *grid* utilizzato nello studio geomeccanico è quello ricavato dallo studio geologico e descritto nel **paragrafo §2.3**.

4.2.2 *Faglie*

Tutte le faglie descritte nel **paragrafo §2.2.2** sono state importate e caratterizzate nel modello meccanico.

4.2.3 *Classificazione geomeccanica*

Si è assunto che, alla scala del problema in esame, il sistema fosse assimilabile ad un mezzo continuo equivalente; le faglie che lo attraversano sono state considerate come discontinuità singolari.

Le formazioni modellizzate sono state distinte in 10 differenti classi geomeccaniche, identificate in funzione della litologia e dei parametri geomeccanici e finalizzate alla descrizione del comportamento sforzi–deformazioni dell’ammasso roccioso. Sulla base di considerazioni litologiche derivanti dall’analisi dei *log* al pozzo Gradizza 1 e dei profili 1:1000 dei pozzi perforati all’interno dell’area modellizzata, sono stati individuati quattro litotipi dominanti: argille, sabbie, marne e rocce carbonatiche (i.e., calcari e dolomie). In fase di definizione del modello 3D è stata introdotta una certa semplificazione della stratigrafia, soprattutto per quanto riguarda le formazioni basali pre-pleistoceniche, dettata sia da esigenze di modellizzazione sia dalla qualità e quantità dei dati disponibili. Infatti, le formazioni meglio caratterizzate sono quelle sabbioso-argillose che costituiscono il giacimento e il terreno sovrastante fino al piano campagna: questo volume rappresenta la porzione di modello maggiormente interessata dai fenomeni oggetto di studio. Le formazioni basali risultano scarsamente influenzate dalle operazioni di produzione e, comunque, non critiche dal punto di vista dell’analisi della subsidenza. Nell’ottica della modellizzazione, esse assolvono il compito principale di garantire le necessarie condizioni al contorno.

I termini “argille” e “sabbie” si riferiscono a terreni che si trovano a profondità superiori a 800 m e che quindi sono naturalmente soggetti a sforzi orizzontali (tensioni intermedie e minime) di ordine superiore a 8 MPa. Per questo motivo, le caratteristiche meccaniche di questi terreni sono più assimilabili a quelle delle rocce che a quelle dei terreni sciolti.

In **Tab. 4.1** vengono riportate le classi meccaniche, e i relativi livelli numerici di giacimento (*layer*), associate alla sequenza stratigrafica tipo definita nell’area di interesse e riprodotta nel modello meccanico.

Ad ogni classe sono stati assegnati i parametri di deformabilità e di resistenza e la legge di comportamento sforzi-deformazioni, assunta di tipo elastico-perfettamente plastico. Le proprietà assegnate ai terreni e alle rocce di ogni classe geomeccanica sono quindi:



- I. parametri di inizializzazione, utilizzati per determinare lo stato tensionale della formazione indisturbata;
- II. proprietà pseudo-elastiche: modulo di Young in funzione della profondità, rapporto di Poisson e coefficiente di Biot (nell'ipotesi di comportamento elastico isotropo);
- III. parametri di resistenza: coesione e angolo di resistenza a taglio, assumendo come criterio di resistenza quello di Mohr-Coulomb.

Per una descrizione dettagliata dei sopracitati parametri meccanici delle rocce si rimanda a Fjær et al. (2008) e a Lancellotta (2004).

I criteri adottati per definire le proprietà pseudo-elastiche e i parametri di resistenza sono illustrati nei successivi paragrafi.

Nell'**ALLEGATO A** sono riportati i parametri di deformazione, inizializzazione e resistenza per ciascuna classe geomeccanica di riferimento.

Tab. 4.1: Zone di modello, classi geomeccaniche e relativi livelli numerici (*layer*).

ZONA DI MODELLO	LAYER NUMERICI	CLASSE GEOMECCANICA
Alluvioni	1 – 2	1
Sabbie di Asti sup.	3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8	2
Caprock superiore	9	3
Reservoir Superiore	10	4
Caprock principale	11	3
Reservoir Principale	12-13	4
Sabbie di Asti inf.	14 – 15 - 16	5
Argille del Santerno	17	6
Torbiditi plioceniche	18	7
Gessi	19	8
Marne sabbiose	20-21	9
Calcari e dolomie	22-23	10



4.2.4 Caratterizzazione geomeccanica

I parametri di deformazione e resistenza sono stati definiti sulla base dell'interpretazione dei *log* sonici e di densità acquisiti al pozzo Gradizza 1, dei risultati dei test di laboratorio condotti sui campioni prelevati in pozzo, nonché sulla base delle conoscenze degli autori e delle informazioni reperite in letteratura (Dream s.r.l., 2015).

Durante la perforazione del pozzo esplorativo Gradizza 1 è stata prelevata una carota di fondo con l'intento di investigare le caratteristiche litologiche e meccaniche del *reservoir* e delle argille di copertura. La carota è stata prelevata a partire da una profondità di 848 m MD RT con un carotiere tipo MCT 443 di lunghezza 9 m e diametro 4". La carota ha una lunghezza di 7.22 m (80.2 % di recupero) ed è stata recuperata quasi totalmente nella *caprock*; la formazione mineralizzata non è stata carotata a causa della maggiore componente siltoso-sabbiosa poco addensata, come emerge dai *log* elettrici eseguiti successivamente in foro.

La carota è costituita principalmente da argille e argille siltose con tracce di sabbie molto fini e nell'intervallo di prelievo è stata rilevata una percentuale di gas totale pari al 4.66%.

Nonostante siano state seguite le procedure standard di prelievo e conservazione, i provini confezionati erano così disturbati che le prove geotecniche eseguite (triassiali e edometriche), finalizzate alla determinazione dei parametri di resistenza e deformabilità, hanno dato risultati non rappresentativi se paragonati con il comportamento standard di tali terreni prelevati a profondità dell'ordine di 850 m.

Come verrà spiegato in seguito, le sole prove di laboratorio che hanno potuto essere utilizzate ai fini della caratterizzazione della roccia di copertura sono le prove di classificazione dei terreni, con particolare riferimento alle granulometrie e ai limiti di Atterberg.

Parametri di deformabilità dei mezzi porosi

Il campo di esistenza dei parametri elastici di un mezzo poroso è definito anche in funzione della profondità del mezzo e del livello di deformazione indotta dalla produzione, come mostrato dall'andamento del modulo a taglio, G (Davich, 2004) riportato in **Fig. 4.2**.

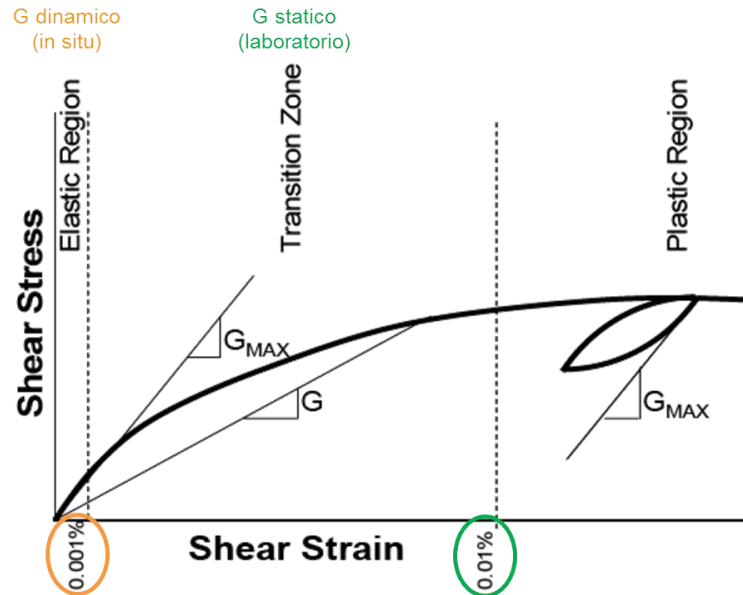


Fig. 4.2: Variazione del modulo elastico a taglio, G , in funzione del livello di deformazione (Davich, 2004).

La situazione iniziale, in cui le deformazioni massime sono dell'ordine delle unità di millesimi di m/m , è prevalentemente governata dai moduli elastici dinamici, meglio stimati da prove geofisiche. Con l'aumentare delle deformazioni principali massime, i valori dei moduli elastici diminuiscono progressivamente, fino a raggiungere, a deformazioni dell'ordine del centesimo di m/m , quelli statici. In questa fase il modulo elastico può essere determinato da prove meccaniche di laboratorio, quali la compressione uniassiale o triassiale consolidata, con misura delle deformazioni. Con un ulteriore aumento delle deformazioni principali massime, il comportamento del mezzo poroso diventa ancora più marcatamente non lineare, fino al raggiungimento delle condizioni di plasticità, dove il valore del modulo elastico diventa trascurabile (se si assume un comportamento del mezzo elastico – perfettamente plastico) o pari a valori dell'ordine del decimo del modulo elastico statico iniziale (se si assume un comportamento incrudente).

Il comportamento del giacimento oggetto di studio è stato esaminato facendo ricorso alle analisi di sensitività al fine di valutare l'impatto dei parametri elastici sulla subsidenza. Tenendo conto del campo di esistenza dei moduli elastici, la risposta del sistema è stata analizzata considerando sia parametri elastici statici, E_s , desunti dalla letteratura, sia dinamici, E_D , ottenuti dall'interpretazione dei *log* di pozzo. Va comunque sottolineato come, in genere, le variazioni di pressione imposte dalle attività di produzione, soprattutto in caso di volumi movimentati medio-bassi, inducono, sia in giacimento sia nelle formazioni limitrofe, deformazioni molto ridotte dell'ordine di qualche millesimo di m/m . In tali condizioni, i parametri dinamici risultano quelli che più realisticamente riproducono il comportamento deformativo del sistema, mentre l'adozione di moduli elastici statici rappresenta lo scenario più cautelativo (Rocca et al, 2019).

I *log* sonici e di densità acquisiti al pozzo Gradizza 1 nel 2013 nell'intervallo [360-998] m TVDss hanno consentito di calcolare l'andamento del modulo elastico dinamico in funzione della profondità. L'intervallo analizzato corrisponde alla Formazione Carola. Come si vede



dalla **Fig. 4.3**, i moduli elastici aumentano in funzione della profondità. In particolare, in giacimento variano tra 4 e 6 GPa.

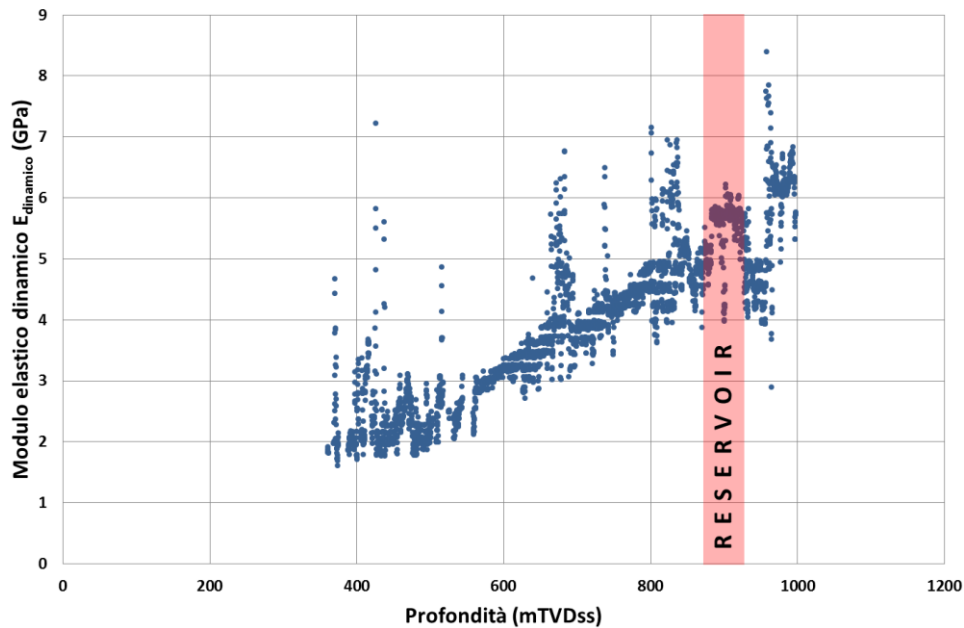


Fig. 4.3: Andamento del modulo elastico dinamico in funzione della profondità. Evidenziata in rosso la fascia di profondità corrispondente al *reservoir*.

Per la definizione dei moduli elastici statici è stata adottata la seguente legge di tipo esponenziale che correla la compressibilità verticale uniaassiale, c_M , e la tensione efficace verticale, σ'_v :

$$c_M = 1.3696 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma'_v^{-1.1347} \quad (4.1)$$

L'**equazione (4.1)** descrive il comportamento di un ammasso roccioso vergine in condizioni di carico assimilabili alle sollecitazioni indotte dalla produzione primaria. Tale legge è frutto di studi a carattere sia sperimentale sia teorico effettuati presso il Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate (DMMMSA) dell'Università di Padova (Teatini et al., 2011), tesi a valutare la compressibilità delle *caprock* e degli acquiferi salini profondi presenti nel territorio italiano. È da notare che questi studi non introducono differenze nei valori dei moduli elastici tra le formazioni arenacee e argillose; questa semplificazione può ritenersi corretta dal momento che la differenza dei moduli pseudo-elastici relativi ai due litotipi è piuttosto limitata, soprattutto se confrontata con la dipendenza di entrambi i moduli dalla profondità a cui si trovano le formazioni in esame.

La **Fig. 4.4** mostra la variazione in funzione della profondità sia del modulo elastico dinamico, E_d , derivata dall'interpretazione dei log, sia del modulo elastico statico, E_s , in accordo con l'equazione proposta da Teatini et al.

Il rapporto tra i moduli statici e dinamici utilizzati per descrivere il comportamento deformativo del giacimento e della roccia incassante è $E_D \sim (3 \div 3.5) \cdot E_s$ (in corrispondenza del



giacimento) ed è in accordo con i dati disponibili in letteratura (Martínez et al., 2012; Mashinsky, 2003).

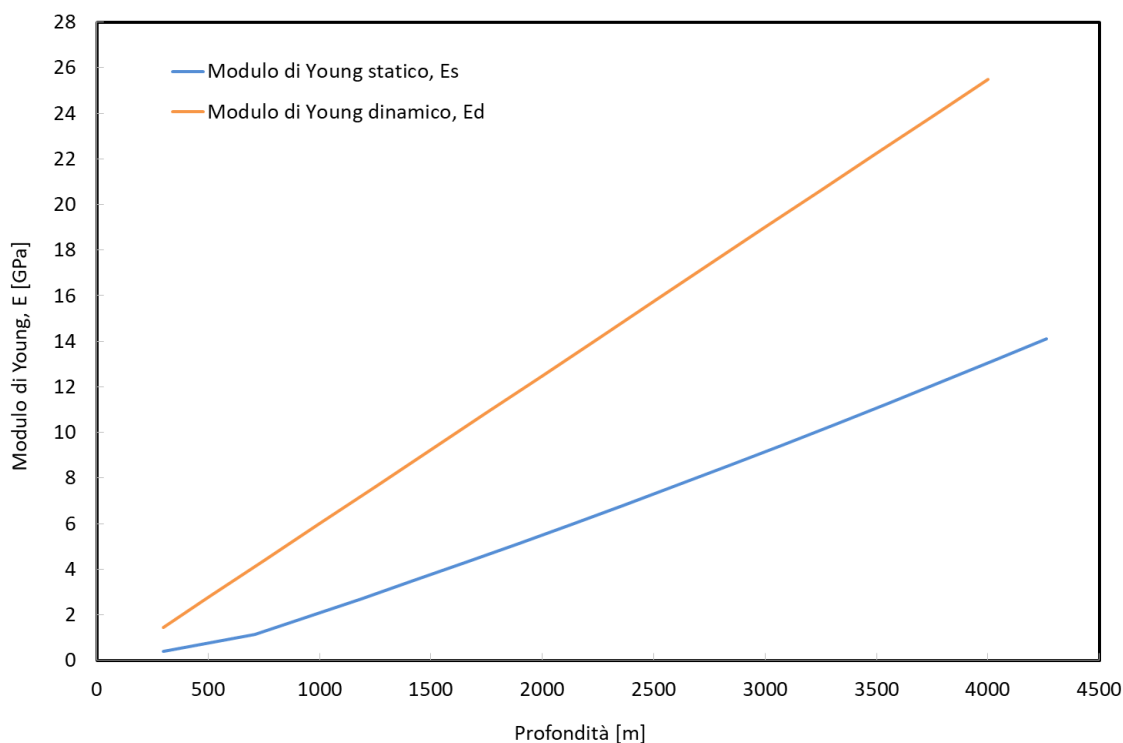


Fig. 4.4: Relazioni tra modulo elastico e profondità.

Gli altri parametri di deformazione, ovvero i coefficienti di Poisson e di Biot, sono stati definiti considerando il sistema isotropo sulla base dei dati disponibili in letteratura (Fjær et al., 2008; Lancellotta, 2004) e delle conoscenze degli autori.

Parametri di resistenza dei mezzi porosi

I parametri di resistenza sono relativi al criterio di Mohr-Coulomb: i valori di coesione e dell'angolo di attrito sono stati definiti in funzione della litologia e della profondità delle formazioni.

Le sole prove di laboratorio rappresentative, e quindi utili ai fini della caratterizzazione del sistema, sono le prove di classificazione dei terreni: in particolare l'analisi dei limiti di Atterberg ha consentito di stimare in modo indiretto l'angolo di resistenza a taglio delle argille di copertura (Dream s.r.l., 2015).

I limiti di Atterberg sono correlati ai contenuti limite di acqua di un terreno a grana fine e vengono utilizzati per identificare e classificare gli stessi. Un terreno a grana fine, infatti, può presentarsi in quattro differenti stati fisici, ovvero: solido, semisolido, plastico e liquido, a seconda del suo contenuto d'acqua, w . Inoltre, poiché l'interazione tra le particelle è influenzata dal contenuto d'acqua, le caratteristiche di compressibilità e resistenza al taglio di un'argilla possono essere correlate ai valori limite di w che individuano il passaggio tra due stati (Lancellotta, 1991) (**Fig. 4.5**).

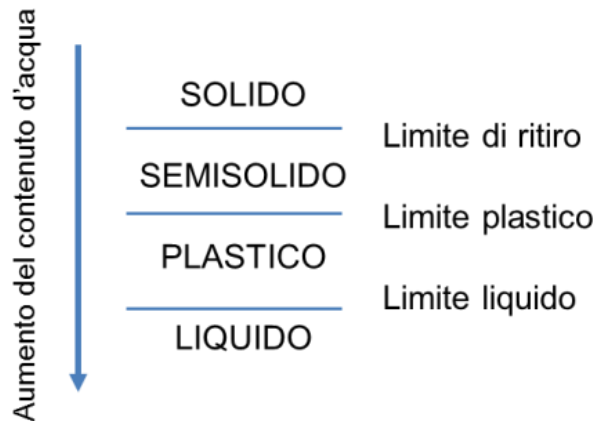


Fig. 4.5: Limiti di Atterberg (Lancellotta, 1991).

In particolare, il limite liquido (LL o w_L) è il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale il terreno possiede una resistenza al taglio così piccola che un solco, praticato in un campione rimaneggiato, si richiude quando il cucchiaino che lo contiene è sollecitato con dei colpi, secondo una procedura standard (Lancellotta, 1991). Il limite plastico (LP o w_P) è il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale il terreno inizia a perdere il suo comportamento plastico (Lancellotta, 1991). L'indice di plasticità (IP) è dato dalla differenza tra il limite liquido e il limite plastico e indica il campo di variazione del contenuto d'acqua all'interno del quale il terreno ha un comportamento plastico; può cioè essere deformato o rimaneggiato senza cambio di volume e senza fessurarsi (Lancellotta, 1991).

Il valore medio ottenuto dai test effettuati per l'indice plastico IP è 15%, mentre quello per il limite liquido, w_L , è 41%. Questi valori sono stati utilizzati per classificare il terreno tramite la carta di Casagrande (**Fig. 4.6**), un sistema di classificazione utilizzato per i limi e le argille. Per i terreni a grana fine, infatti, il comportamento è influenzato dal tipo di minerale e non dalle dimensioni delle particelle. Il terreno analizzato può essere classificato come limo inorganico di media compressibilità – argilla inorganica di media plasticità.

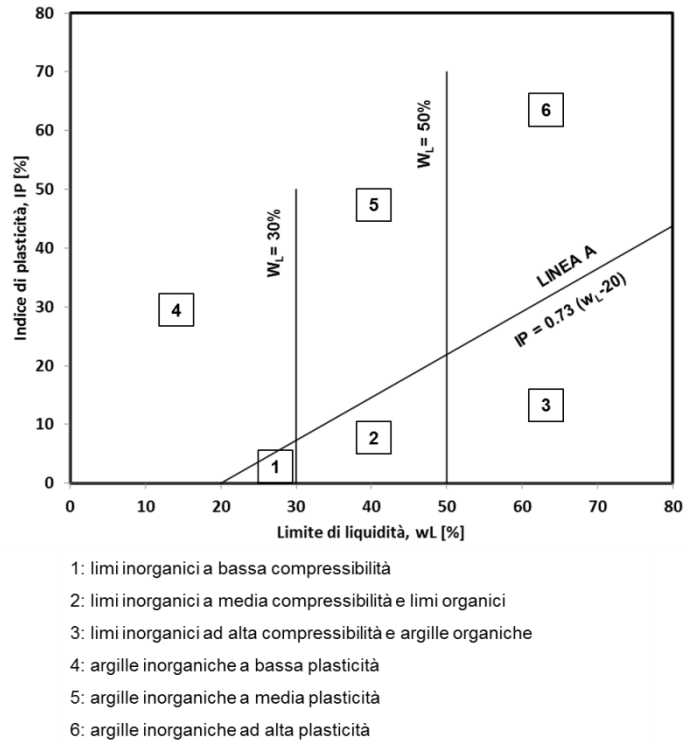


Fig. 4.6: Carta di Casagrande (Lancellotta, 1991).

Tramite la nota correlazione riportata in Fig. 4.7 (Lupini et al., 1981) è possibile valutare un angolo di resistenza a taglio residuo per il terreno in esame compreso tra 22° e 33° . Tenendo conto che questa correlazione è valida per terreni "residuali", ovvero terreni che hanno subito movimenti franosi o altri tipi di movimenti nella loro storia, è ragionevole stimare per questi terreni un angolo di resistenza a taglio variabile tra $24^\circ - 30^\circ$.

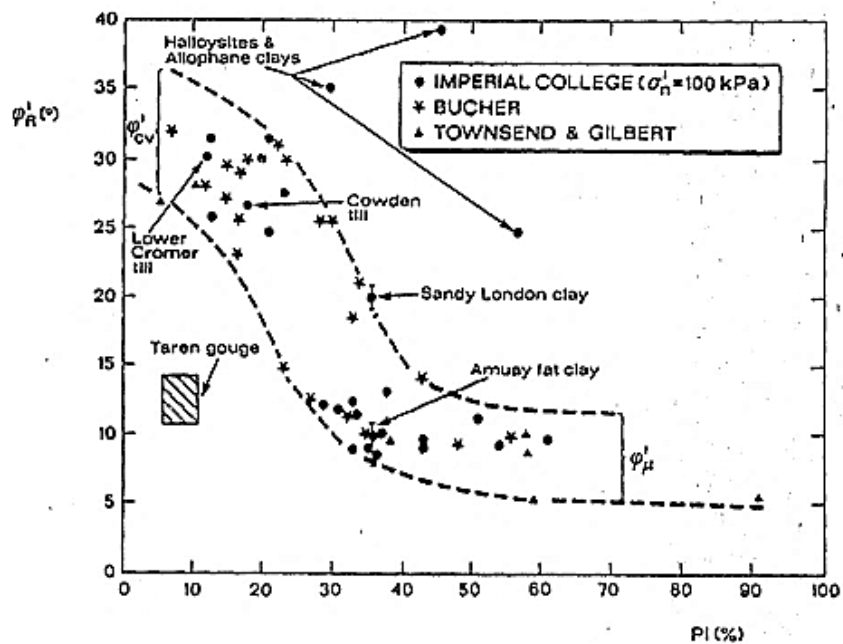


Fig. 4.7: Correlazione tra l'indice plastico e l'angolo d'attrito residuo (Lupini et al., 1981).



I parametri ottenuti dall'interpretazione dei limiti di Atterberg sono stati confrontati e integrati sulla base delle prove geotecniche di laboratorio disponibili su formazioni argillose analoghe (Mauri, 2010 e Vigani, 2011), mentre i valori dei parametri di resistenza delle sabbie e delle formazioni basali sono stati determinati sulla base dei dati disponibili in letteratura (Fjær et al., 2008; Lancellotta, 2004) e delle conoscenze degli autori.

Parametri di deformabilità e resistenza delle faglie

I parametri geomeccanici utilizzati per caratterizzare le faglie sono la rigidezza normale e di taglio e i parametri di resistenza a taglio (**Tab. 4.2**). In particolare, al contatto tra le pareti delle faglie si è imposta una brusca riduzione della resistenza di tipo coesivo, in considerazione dei rigetti. La rigidezza di taglio è stata determinata simulando un fenomeno di scorrimento a grande scala, mentre la rigidezza normale è stata assunta maggiore della rigidezza di taglio, in accordo con i dati reperiti in letteratura (Roest et al., 1999).

Tab. 4.2: Caratterizzazione degli elementi faglia.

Resistenza normale	Resistenza di taglio	Coesione	Angolo d'attrito	Angolo di dilatanza
(bar/m)	(bar/m)	(bar)	(°)	(°)
30000	4000	0.01	30	10

4.3 Inizializzazione del modello

Il modello geomeccanico, popolato secondo i criteri definiti nei paragrafi precedenti, è stato successivamente inizializzato: il campo tensionale e la distribuzione delle pressioni interstiziali che competono alle formazioni indisturbate sono stati determinati in funzione della profondità, della tipologia della formazione e dei fluidi saturanti.

Il campo delle pressioni originali è stato definito in funzione dei valori misurati in corrispondenza del giacimento al momento della scoperta. La pressione originale della formazione mineralizzata a gas (Livello Principale) era pari a 87.41 barsa (89.13 kg/cm²_a), alla profondità di riferimento (*datum*) di 850.5 m TVDss. La pressione iniziale che compete alle celle di modello mineralizzate ad acqua (non in comunicazione idraulica con il culmine mineralizzato e dunque non incluse nel modello dinamico) è stata determinata assumendo il gradiente idrostatico dell'area di interesse. La falda idrica superficiale è stata ipotizzata coincidente con il livello del piano campagna. Sulla base di questi dati, tutte le celle del modello mineralizzate ad acqua sono state popolate con valori di pressione calcolati secondo il gradiente idrostatico, mentre le pressioni delle celle nei livelli mineralizzati a gas sono state calcolate secondo quanto definito nel **paragrafo §3.4**. Per quanto concerne il campo tensionale originale, non essendo disponibili informazioni circa l'orientamento e l'entità degli sforzi principali, il modello è stato inizializzato assegnando uno stato tensionale gravitazionale. Si è ipotizzato, quindi, che lo stress verticale fosse uguale alla tensione massima principale, σ_1 , e che il campo di sollecitazione fosse anisotropo nel piano orizzontale secondo i rapporti:



$$\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = 0.8 \quad \text{e} \quad \frac{\sigma'_H}{\sigma'_v} = 0.9 \quad (4.2)$$

4.4 Principi di analisi

Le analisi meccaniche possono essere effettuate a differenti scale e considerando differenti livelli di integrazione tra le discipline coinvolte in uno studio di giacimento. Modelli analitici semplificati vengono in genere utilizzati per fornire una valutazione speditiva, seppur sommaria, dei fenomeni geomeccanici meno complessi. Tuttavia, la costruzione di un modello numerico 3D esteso a scala regionale, unitamente all'adozione di un approccio di analisi che tenga conto dell'interazione tra l'aspetto dinamico e l'aspetto meccanico del problema, risultano necessari per analizzare l'evoluzione dello stato tenso-deformativo della roccia serbatoio e delle formazioni adiacenti a seguito della produzione degli idrocarburi (Dea et al, 2003; Settari et al., 1999, 2002, 2007).

L'analisi delle variazioni del campo tensionale e deformativo indotte dalla produzione di gas dal giacimento di Gradizza è stata effettuata avvalendosi dell'approccio geomeccanico-fluidodinamico di tipo *one-way coupling*. Questa metodologia di analisi consente di studiare il comportamento geomeccanico delle formazioni profonde in base all'evoluzione delle pressioni nel tempo.

Secondo l'approccio *one-way coupling* ad ogni *time-step* di analisi viene calcolata la distribuzione delle pressioni interstiziali, indotte dalla produzione di gas, nella formazione mineralizzata e nell'acquifero circostante. La pressione nelle formazioni indisturbate resta costante ed uguale al valore iniziale (**Fig. 4.8**).

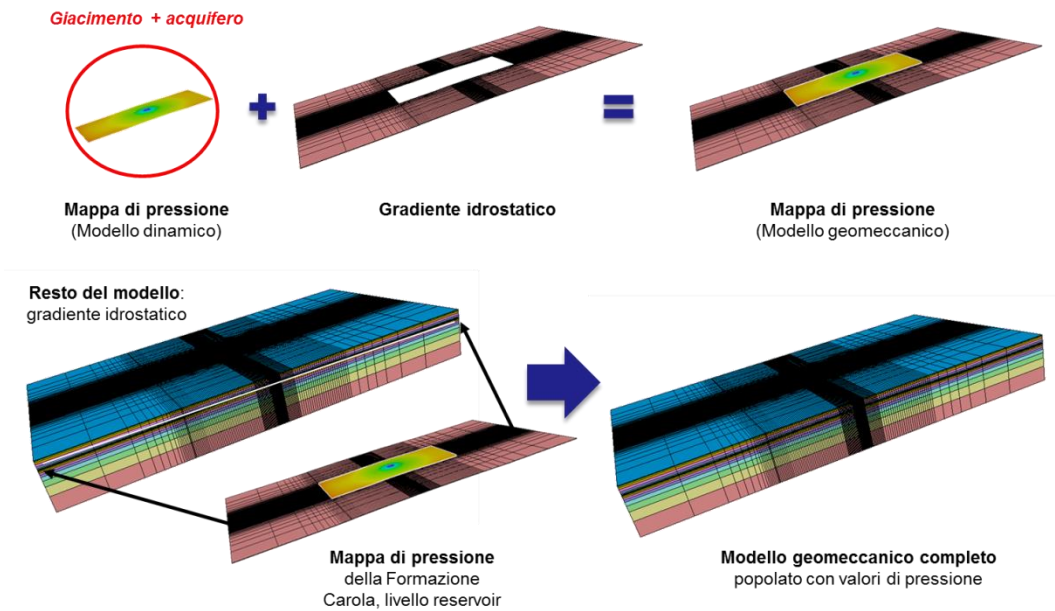


Fig. 4.8: Definizione delle mappe di pressione per ciascun *time-step* di analisi.

Sulla base della variazione delle pressioni rispetto al passo temporale precedente si determina la corrispondente variazione dello stato tenso-deformativo del sistema mediante simulazione geomeccanica. Raggiunto il nuovo equilibrio geomeccanico, per ogni *time-step* di analisi, vengono quindi verificate le condizioni di sicurezza del sistema in termini di resistenza meccanica agli sforzi di taglio e di trazione e vengono calcolate le deformazioni e quindi gli spostamenti delle rocce in profondità nonché come tali deformazioni si propagano in superficie (Fig. 4.9).

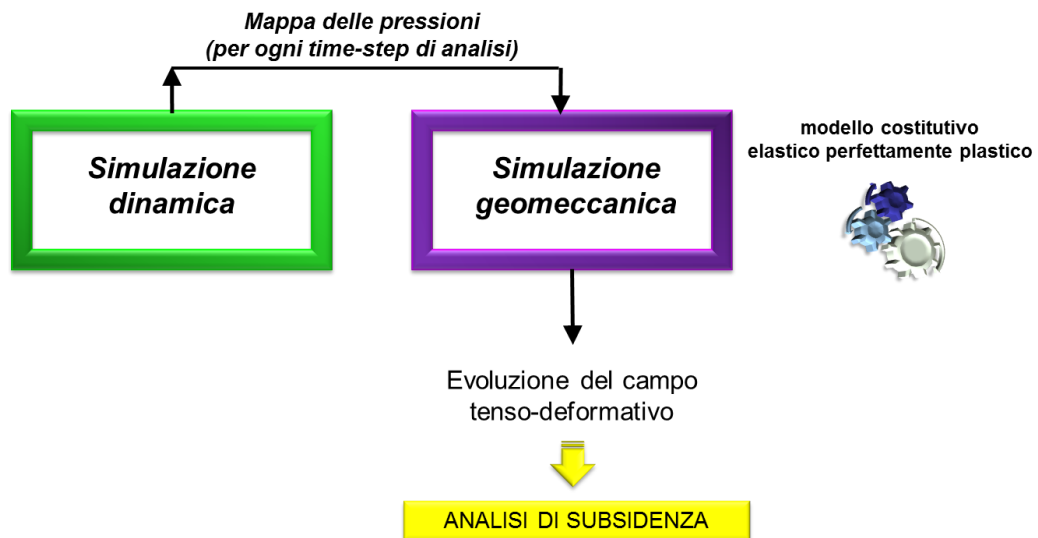


Fig. 4.9: Approccio *one-way coupling*.



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

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

$$\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (4.3)$$

dove φ è l'angolo di attrito.

L'**equazione (4.4)** esprime la relazione, nel criterio di Mohr-Coulomb, tra la resistenza a compressione semplice, σ_c , la coesione, c , e l'angolo d'attrito, φ :

$$\sigma_c = \frac{2c \cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (4.4)$$

Gli stati tensionali elastici si trovano all'interno del solido, mentre i punti che si trovano sulla sua superficie rappresentano una condizione di plasticità (**Fig. 4.10**).

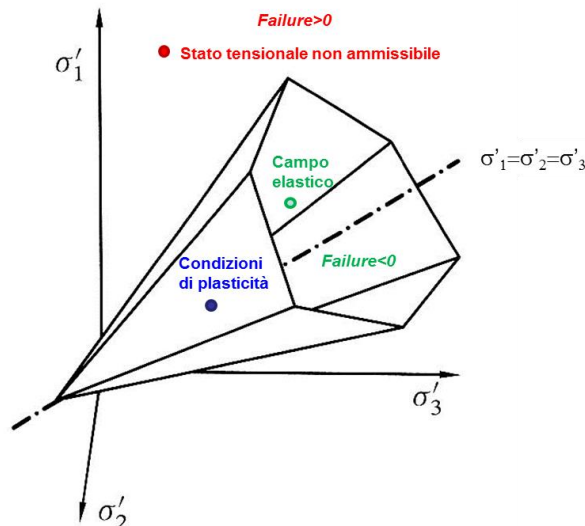


Fig. 4.10: Criterio di Mohr-Coulomb sul piano delle tensioni principali (Fjær, 2008).

Dal momento che il modello costitutivo scelto è elasto-perfettamente plastico, non si ha né incrudimento né rammollimento, per cui tutti gli stati tensionali rappresentati da punti che si trovano al di fuori di detto solido sono non compatibili con l'equilibrio del sistema.



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

4.4.1 *Analisi effettuate*

L'analisi dell'evoluzione delle tensioni e delle deformazioni indotte nel giacimento e nelle formazioni circostanti dalla futura messa in produzione del *reservoir* è stata condotta al fine di valutare il fenomeno della subsidenza.

L'effetto principale della produzione, che provoca un aumento delle tensioni efficaci nella zona di produzione, è quello di indurre spostamenti verticali diretti verso il basso. Questi spostamenti sono massimi al contatto tra il giacimento e la *caprock* e vanno via via riducendosi nel propagarsi verso la superficie, fino a raggiungere un valore minimo sul piano campagna (fenomeno della subsidenza).

Poiché il comportamento sforzi-deformazioni delle rocce è marcatamente non lineare, anche in fase elastica, è stata svolta un'analisi di sensitività mirata a definire l'effetto, in termini di subsidenza, della variazione dei moduli elastici dell'intero sistema. In particolare, come precedentemente accennato, sono stati analizzati due casi che differiscono sostanzialmente nella definizione dei moduli elastici (**paragrafo §4.2.4** - Parametri di deformabilità dei mezzi porosi):

- caso statico: moduli elastici pari ai valori statici da letteratura;
- caso dinamico: moduli elastici dinamici ottenuti dall'analisi dei *log* acquisiti al pozzo Gradizza 1.

La risposta del sistema è stata analizzata durante il periodo di produzione primaria (ipotizzato di 35 anni) e considerando ulteriori 40 anni successivi al periodo erogativo (periodo di monitoraggio).

4.4.2 *Time-step di analisi*

L'evoluzione della subsidenza è stata valutata adottando 9 passi temporali ritenuti particolarmente rappresentativi (**Fig. 4.11**). La produzione primaria induce in giacimento una diminuzione di pressione di circa 50 bar in 35 anni. Nel successivo periodo di chiusura si raggiunge una nuova fase di equilibrio dinamico del sistema giacimento + acquifero.

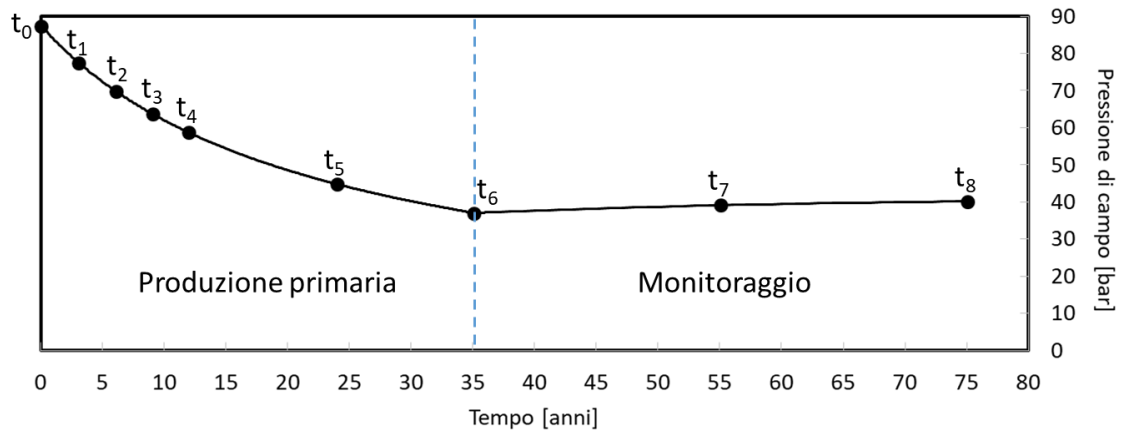


Fig. 4.11: Evoluzione temporale della pressione media di giacimento.

In **Tab. 4.3** sono riassunti i *time-step* di analisi adottati per la simulazione geomeccanica: è stato utilizzato un *time-stepping* più fitto in fase di produzione primaria, mentre per analizzare i successivi 40 anni di monitoraggio sono stati individuati 2 *time-step* di 20 anni ciascuno.

Tab. 4.3: Time-step di analisi.

TIME-STEP	TEMPO (anni)	GESTIONE GIACIMENTO
t ₀	0	Produzione primaria
t ₁	3	
t ₂	6	
t ₃	10	
t ₄	12	
t ₅	24	
t ₆	35	Periodo di monitoraggio
t ₇	55	
t ₈	75	

4.5 Analisi dei risultati

Le **Fig. 4.12**, **Fig. 4.13**, **Fig. 4.14** e **Fig. 4.15** mostrano l'evoluzione dello spostamento verticale indotto sul piano campagna in termini di cono di subsidenza nell'ipotesi di parametri elastici statici e dinamici, considerando i *time-step* di analisi più significativi (t₆ e t₈). Sulla sinistra di ciascuna figura è visualizzata la mappa con le isocline degli spostamenti verticali in superficie e l'ubicazione del pozzo Gradizza 1. Sulla destra di ciascuna figura viene rappresentata una sezione verticale del cono di subsidenza, lungo la sezione AA'.



La Fig. 4.16 riporta l'evoluzione temporale della pressione media di giacimento e del relativo spostamento verticale indotto sul piano campagna (a) e al top del giacimento (b), in corrispondenza del pozzo Gradizza 1, mettendo a confronto i risultati del "caso statico" e del "caso dinamico".

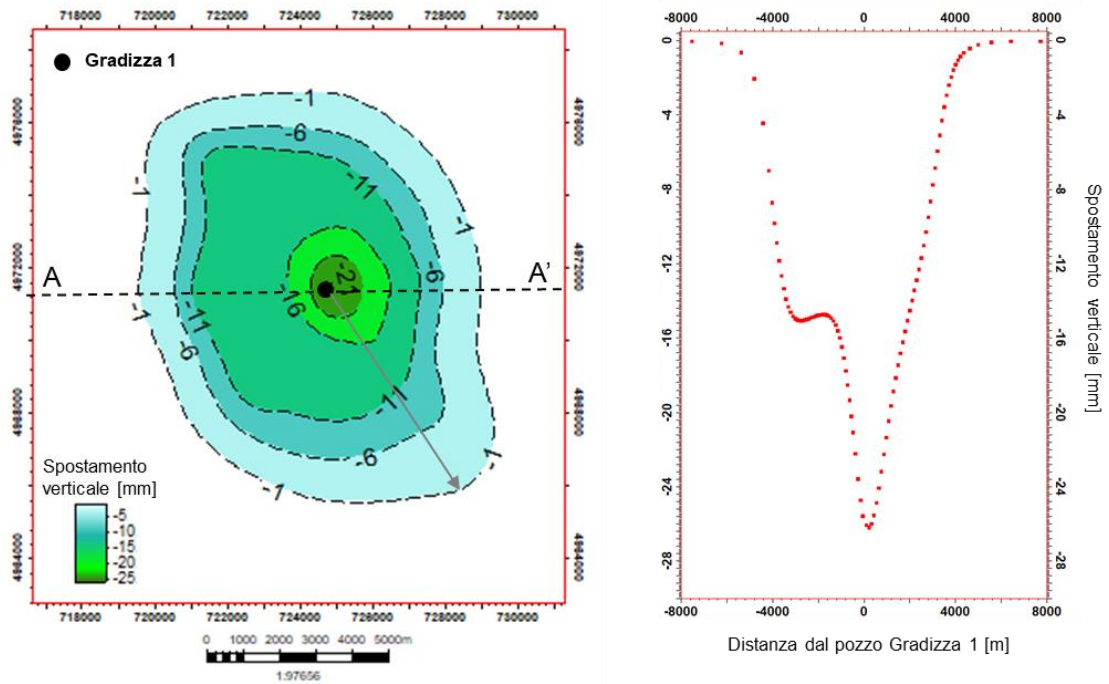


Fig. 4.12: Caso statico - spostamento verticale indotto sul piano campagna a fine produzione primaria (t_6): mappa (sinistra) e sezione AA' centrata al pozzo Gradizza 1 (destra).

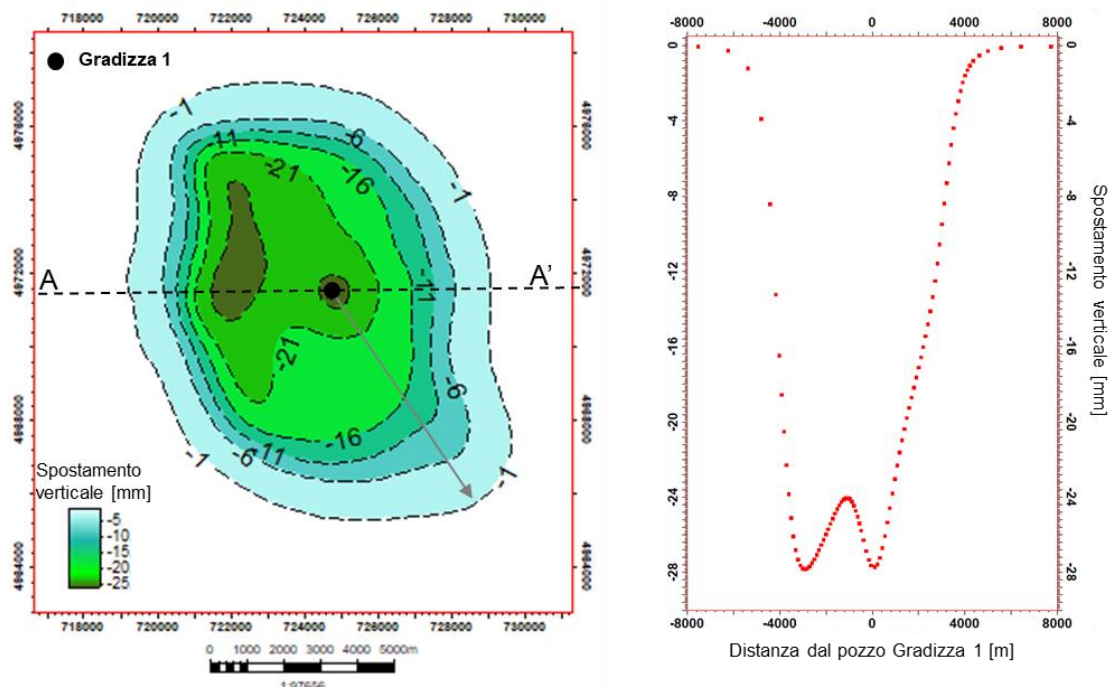


Fig. 4.13: Caso statico - spostamento verticale indotto sul piano campagna alla fine del periodo di monitoraggio (t_8): mappa (sinistra) e sezione AA' centrata al pozzo Gradizza 1 (destra).

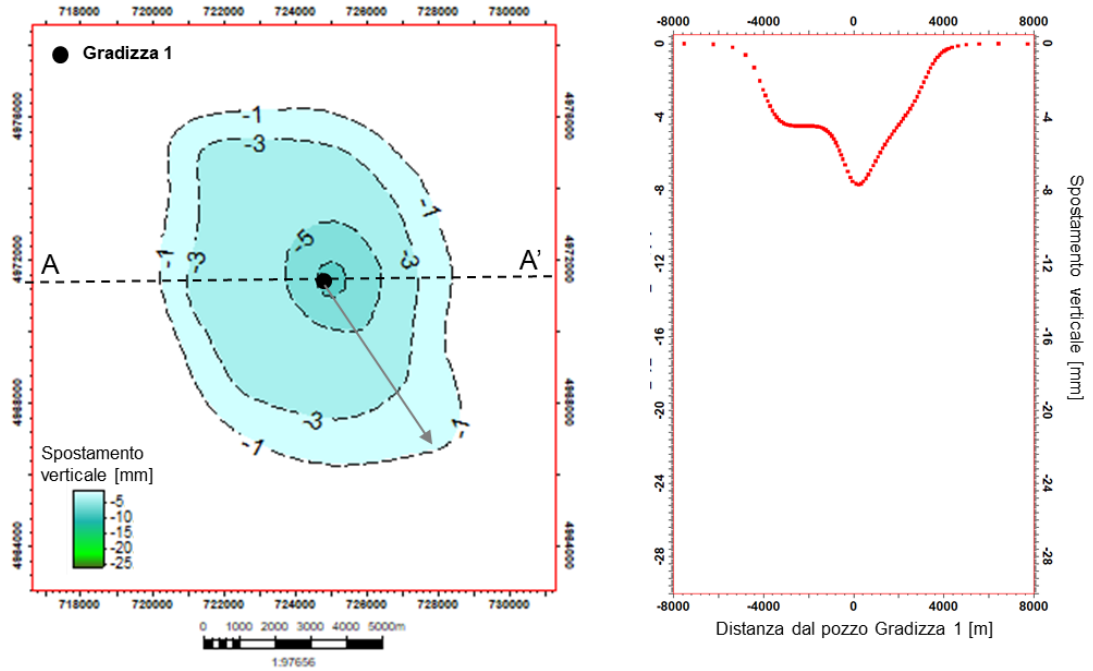


Fig. 4.14: Caso dinamico - spostamento verticale indotto sul piano campagna a fine produzione primaria (t_6): mappa (sinistra) e sezione AA' centrata al pozzo Gradizza 1 (destra).

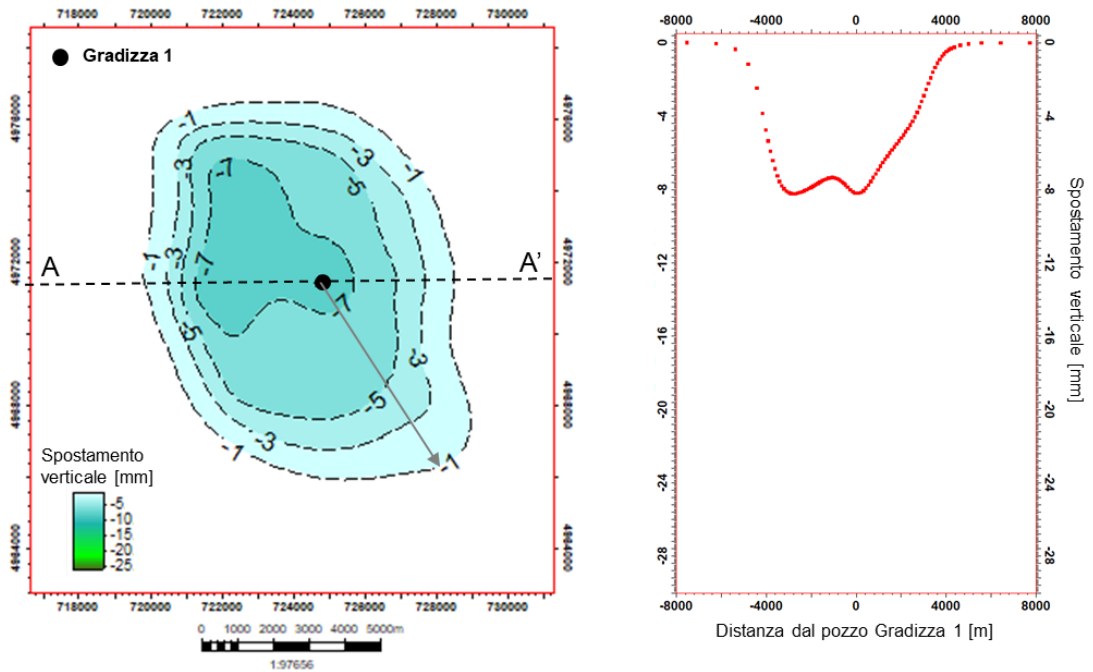
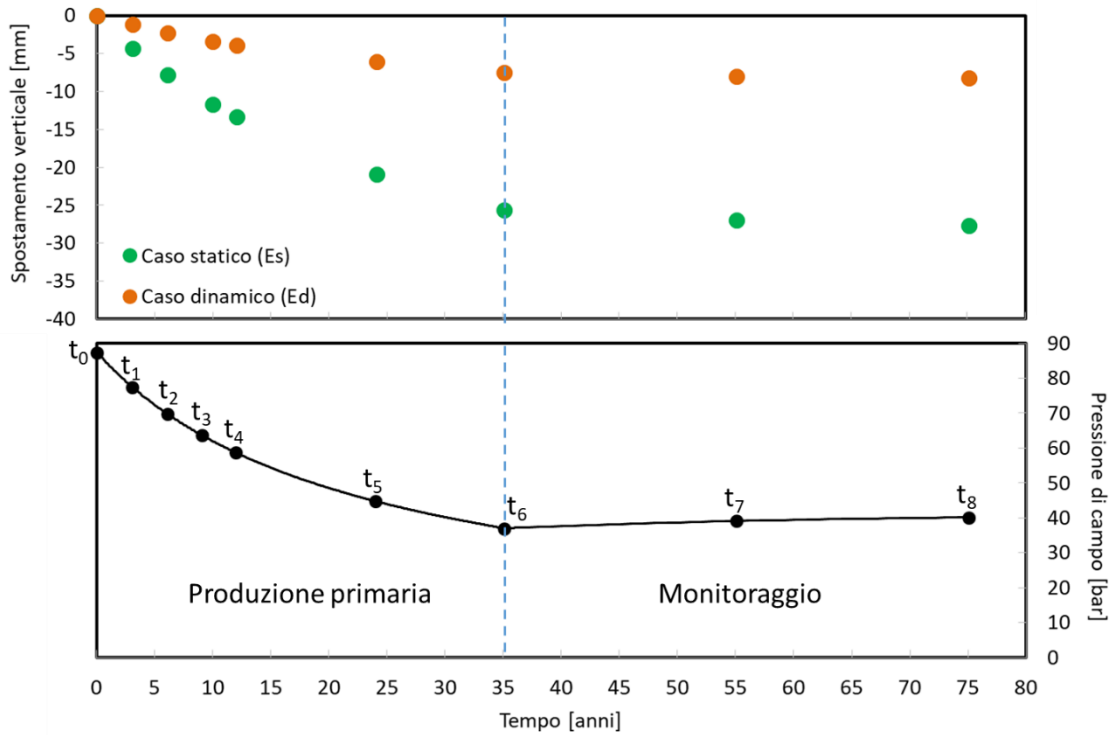
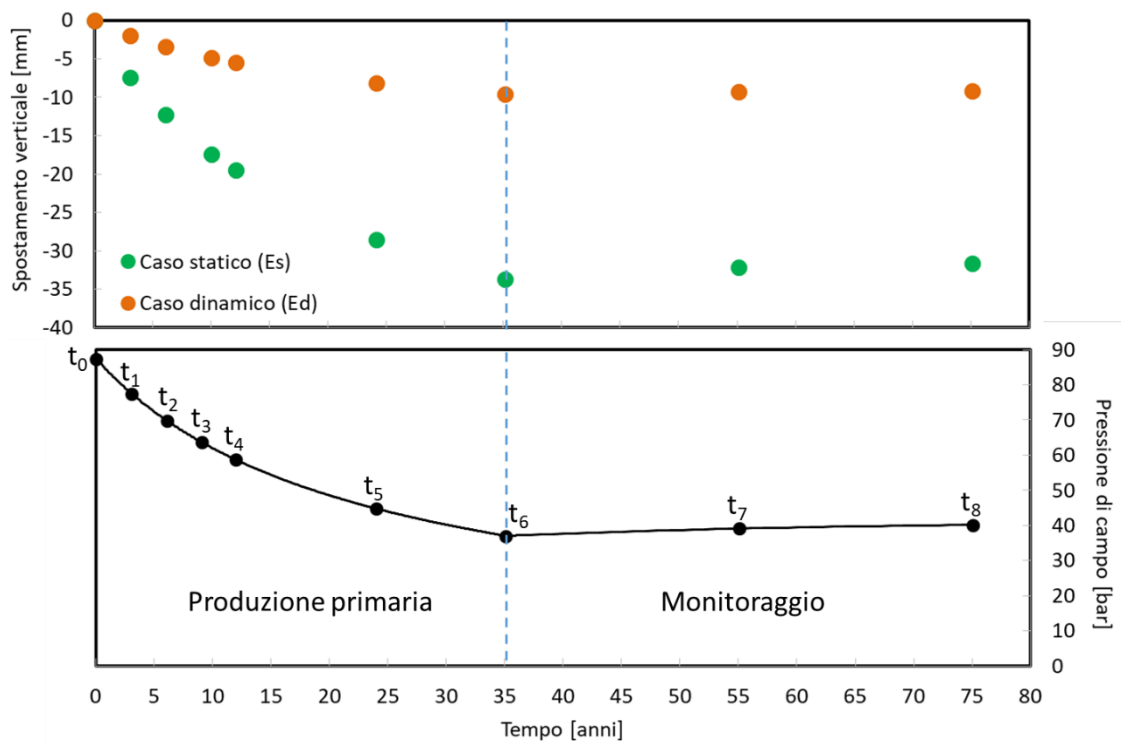


Fig. 4.15: Caso dinamico - spostamento verticale indotto sul piano campagna alla fine del periodo di monitoraggio (t_8): mappa (sinistra) e sezione AA' centrata al pozzo Gradizza 1 (destra).



(a)



(b)

Fig. 4.16: Evoluzione temporale della pressione media in giacimento e relativi spostamenti verticali indotti in corrispondenza del pozzo Gradizza 1 sul piano campagna (a) e al top del giacimento (b), nel caso statico e nel caso dinamico.



La riduzione della pressione interstiziale dovuta alla messa in produzione del giacimento causa un conseguente progressivo aumento della subsidenza fino al massimo spostamento verticale raggiunto alla fine della produzione primaria (t_6): per una *depletion* massima di circa 50 bar nel caso statico si è stimato uno spostamento verticale massimo del piano campagna pari a -25.6 mm (pari ad una media di -0.73 mm/anno), mentre nel caso dinamico lo spostamento verticale massimo risulta pari a -7.5 mm (pari ad una media di -0.21 mm/anno). La nuova fase di equilibrio che si instaura nel periodo successivo alla produzione è accompagnata da una progressiva traslazione in direzione nord-ovest del baricentro del cono di subsidenza, dove lo spessore stimato dell'acquifero laterale che delimita il giacimento risulta maggiore, mentre i valori massimi di spostamento verticale si mantengono pressoché inalterati.

L'estensione del cono di subsidenza è stata stimata assumendo una soglia minima di spostamento verticale pari a -1 mm. Il raggio massimo stimato alla fine del periodo di analisi (t_8) risulta pari a circa 6 km nel caso dinamico e a circa 7 km nel caso statico.

I risultati della simulazione geomeccanica mostrano come l'ipotesi statica sia la più conservativa, soprattutto in termini di spostamento verticale massimo che risulta circa 3.4 volte maggiore rispetto al caso dinamico. La **Tab. 4.4** riassume i valori massimi stimati per lo spostamento verticale e per l'estensione del cono di subsidenza in corrispondenza dei passi temporali di analisi più significativi (t_6 e t_8), nell'ipotesi di parametri sia dinamici sia statici.

Nell'**ALLEGATO B** sono riportati i risultati delle simulazioni in corrispondenza dei primi *time-step* successivi all'avvio della produzione (t_1 , 3 anni; t_2 , 6 anni; t_3 , 10 anni). In particolare, l'allegato riporta i risultati in termini di massimo spostamento verticale e massimo raggio del cono di subsidenza e le figure relative all'evoluzione dello spostamento verticale indotto sul piano campagna in termini di cono di subsidenza nell'ipotesi di parametri elastici statici e dinamici.

Tab. 4.4: Subsidenza massima stimata al pozzo Gradizza 1 per i vari casi analizzati in corrispondenza dei passi temporali di analisi più significativi (t_6 e t_8).

TIME-STEP	CASO STATICO		CASO DINAMICO	
	SPOSTAMENTO VERTICALE MAX [mm]	RAGGIO MAX [Km]	SPOSTAMENTO VERTICALE MAX [mm]	RAGGIO MAX [Km]
t_6	-25.6	6.6	-7.5	5.7
t_8	-27.7	6.9	-8.2	6.0



Ad ulteriore conferma della rappresentatività dei risultati ottenuti, va ripreso (**paragrafo §4.2.4**) e sottolineato il comportamento teorico marcatamente non lineare sforzi-deformazioni delle rocce serbatoio e delle formazioni circostanti, il quale dipende dall'entità della deformazione indotta nei mezzi porosi. Quando il sistema viene sottoposto a deformazioni estremamente limitate (i.e., 10^{-3} m/m), i moduli elastici dinamici sono i più adatti a descrivere la risposta elastica del mezzo poroso. All'aumentare delle deformazioni (fino a 10^{-2} m/m), sono i valori dei parametri elastici statici quelli che meglio descrivono il comportamento del sistema. Le deformazioni indotte nel giacimento di Gradizza e nelle formazioni circostanti a causa della futura produzione di idrocarburi sono stimati nell'ordine di 10^{-3} m/m. L'evoluzione della subsidenza relativa alla caratterizzazione elastica dinamica risulta quindi essere quella più realistica, mentre i risultati dell'ipotesi statica rappresentano gli scenari più conservativi e permettono di definire un *range* di variazione in termini di spostamento verticale ed estensione areale del cono di subsidenza.

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



5 BIBLIOGRAFIA

- Aleanna Italia S.p.A. (2023) – Comunicazione effettuata al Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica in data 14 marzo 2023: “Istanza di concessione di coltivazione di idrocarburi liquidi e gassosi a terra denominata “Gradizza”. Integrazione dell’istruttoria finalizzata al conferimento del titolo minerario. Richiesta di aggiornamento del modello statico di giacimento, delle previsioni di produzione e della valutazione economica del progetto”.
- Amadori, C., Garcia-Castellanos, D., Toscani, G., Di Giulio, A., Fantoni, R., & Ghielmi, M. (2017). Restoration of paleo-shorelines through lithospheric 3D modeling and backstripping analysis: The example of the Po Plain-Northern Adriatic region during Late Messinian sea-level drop. Offshore Mediterranean Conference and Exhibition (OMC) 2017, 29–31 March 2017, Ravenna (Italy).
- Amadori, C., Garcia-Castellanos, D., Toscani, G., Sternai, P., Fantoni, R., Ghielmi, M., & Di Giulio, A. (2018). Restored topography of the Po Plain-Northern Adriatic region during the Messinian base-level drop—Implications for the physiography and compartmentalization of the palaeo-Mediterranean basin. *Basin Research*, 30, 1247–1263. <https://doi.org/10.1111/bre.12302>
- Amadori C., Toscani G., Di Giulio A., Maesano F. E., D'Ambrogio C., Ghielmi M., Fantoni R. (2019) From cylindrical to non-cylindrical foreland basin: Pliocene–Pleistocene evolution of the Po Plain–Northern Adriatic basin (Italy) *Basin Res.*, 2019 (2019), pp. 1-25, [10.1111/bre.12369](https://doi.org/10.1111/bre.12369)
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone P. (1992) – *Modello strutturale tridimensionale d’Italia in scala 1: 500.000*, CNR - Centro Nazionale delle Ricerche, Roma, Italia.
- Boccaletti M., Martelli L. (2004) – *Carta sismo-tettonica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000 e note illustrative*, Selca, Firenze, Italia.
- Bruno, L. and Campo, B. and Costagli, B. and Stouthamer, E. and Teatini, P. and Zoccarato, C. and Amorosi, A. (2020). Factors controlling natural subsidence in the Po Plain. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 285-290. Doi: 10.5194/piahs-382-285-2020
- Boccaletti M., Corti G., Martelli L. (2011) – *Recent and active tectonics of the external zone of the Northern Apennines (Italy)*, *Int. J. Earth Sci.*, vol. 100, Firenze, Italia, pp. 1331-1348.
- Cerrina Feroni A., Leoni L., Martelli L., Martinelli P., Ottira G., Sarti G. (2001) – *The Romagna Apennines, Italy: an eroded duplex*, *Geol. J.*, vol. 36, pp. 39–54.



- Cibin U., Segadelli S. (2009) – *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000, foglio 203 Poggio Renatico. Regione Emilia-Romagna*, Servizio geologico, sismico e dei suoli, Bologna, Italia, p. 104.
- Cremonini G., Ricci Lucchi F. (1982) – *Guida alla geologia del margine appenninico-padano*, Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., p. 248.
- Dean R.H., Gai X., Stone C.M., Minkoff S.E. (2003) – *A comparison of techniques for coupling porous flow and geomechanics*. SPE Reservoir Simulation Symposium, 3-5 February, Houston, Texas, USA. DOI: 10.2118/79709-PA.
- Dondi L., Mostardini F., Rizzini A. (1982a) – *Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nella Pianura Padana*. In: Cremonini G., Ricci Lucchi F. (Eds.), *Guida alla Geologia del margine appenninico-padano*, Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., pp. 205-236.
- Dondi, L., Mostardini, F., Rizzini, A. (1982b) – *Lessico delle Formazioni del bacino padano orientale*. In: Cremonini G., Ricci Lucchi F. (Eds.), *Guida alla Geologia del margine appenninico-padano*, Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., pp. 47-58.
- Dream s.r.l. (2015) – CAMPO DI GRADIZZA - Studio della subsidenza indotta dalla produzione del campo. Luglio 2015.
- Eurocodice 6 (1996) – *Progettazione delle strutture in muratura: Regole generali per strutture di muratura armata e non armata*, UNI EN 1996-1-1:2006 Parte 1-1.
- Eurocodice 7 (1997) – *Progettazione geotecnica: Regole generali*, UNI EN 1997-1:2005 Parte 1.
- Fjær, P., Raaen A. M., Horsrud E., Risnes R., Holt R.M. (2008) – *Petroleum Related Rock Mechanics*, Elsevier (2nd Edition), ISBN 978-0-444-50260-5.
- Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M. (2013) – Late Miocene-Middle Pleistocene sequences in the Po Plain-Northern Adriatic Sea (Italy): the stratigraphic record of modification phases affecting a complex foreland basin, *Mar. Pet. Geol.*, vol.42, pp. 50–81.
- Lancellotta R. (2004) – *Geotecnica*, III edizione, Zanichelli.
- Martínez - Martínez J., Benavente D., Garcí'a-del-Cura M. A. (2012). Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. *Bull Eng Geol Environ* 71:263–268 DOI 10.1007/s10064-011-0399-y
- Mashinsky E.I. (2003). Differences between static and dynamic elastic moduli of rocks: physical causes. *Russian Geology Geology and Geophysics*, vol. 44, no. 9, pp. 953-959.
- Massoli D., Koyi H.A., Barchi M.R. (2006) – Structural evolution of a fold and thrust belt generated by multiple décollements: analogue models and natural examples from the Northern Apennines (Italy), *J Struct Geol*, vol. 28, pp. 185-199.
- Mauri A. (2010) – Caratterizzazione fisico-meccanica delle argille di Santerno, tetto del giacimento petrolifero di Sergnano (CR), Degree thesis, University of Milano, Italia.



- NorthSun Italia S.p.A. (2014) – Relazione tecnica - Istanza di Concessione di Coltivazione denominata “Gradizza” derivante dal Permesso di Ricerca “La Prospera”.
- Pieri M., Groppi, G. (1981) – Subsurface geological structure of the Po Plain, Italy, Pubblicazione 414, Progetto Finalizzato Geodinamica, C.N.R., p. 13.
- Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP (1998) – Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna, Ed. S.EL.CA., Firenze, Italia, p. 120.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M.L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi I., Rio D. (1982) – *Guida alla geologia del margine appenninico-padano*, Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. Ital., pp. 17-46.
- Rocca, V.; Cannata Angelo; Gotta A. 2019. A critical assessment of the reliability of predicting subsidence phenomena induced by hydrocarbon production. *Geomechanics for energy and the environment*. Volume: 20. Elsevier Ltd. ISSN: 2352-3808, doi:10.1016/j.gete.2019.100129
- Roest J.P.A., Mulders F.M.M., Kuilman W. (1999) – *Data-limited geomechanical modelling for investigating induced seismicity mechanisms*, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, ISRM-Congress, Paris, France.
- Settari A., Walters D.A. (1999) – *Advances in couplet geomechanical and reservoir modeling with applications to reservoir compaction*. Proc. SPE Reservoir Simulation Symposium, 14-17 February, Society of Petroleum Engineers Inc., Houston, Texas pp: 1-13. DOI: 10.2118/51927-MS.
- Settari A., (2002) – *Reservoir compaction*. *J. Pet. Technol.* 54 (8), 62–69. DOI: 10.2118/76805-JPT.
- Settari A., Sen V. (2007) – *The role of geomechanics in integrated reservoir modeling*. *The Lead Edge (TLE)* 26 (2), 622-627. DOI: 10.1190/1.2737102.
- Teatini P., Gambolati G., Ferronato M., Settari A., Walters D. (2011) – *Land uplift due to subsurface fluid injection*, *Journal of Geodynamics* 51, pp. 1-16.
- Teatini P., Castelletto N., Ferronato M., Gambolati G., Janna C., Cairo E., Marzorati D., Colombo D., Ferretti A., Bagliani A., Bottazzi F. (2011) – *Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy*, *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, F02002. Doi: 10.1029/2010JF001793.
- Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G. (2009) – *Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): seismotectonic implications*, *Boll. Soc. Geol. Ital.*, vol. 128 (2009), pp. 605-613.
- Turrinia C., Lacombe O., Roured F. (2014) – *Present-day 3D structural model of the Po Valley basin, Northern Italy*, *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 56, September 2014, pp. 266–289.
- UNMIG (<http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/>) consultato in aprile 2014.



Vigani G., (2011) – *Caratterizzazione fisico-meccanica delle Argille di Santerno, letto del giacimento petrolifero di Sergnano (CR)*, Degree thesis, University of Milano.



ALLEGATO A CLASSI GEOMECCANICHE

Tab. A.1: Definizione dei parametri geomeccanici per le classi geomeccaniche di riferimento.

CLASSE GEOMECCANICA	PARAMETRI DI DEFORMAZIONE			PARAMETRI DI INIZIALIZZAZIONE						PARAMETRI DI RESISTENZA		
	Modulo di Young	Coeff. di Poisson	Coeff. di Biot	Φ	Densità roccia	Coeff. stress orizz. min (**)	Coeff. stress orizz. max (***)	Azimuth stress orizzontale	Inclinazione stress verticale	Resistenza a compressione uniassiale	Coesione	Angolo d'attrito
	(GPa)	(-)	(-)	(%)	(g/cm ³)	(bar)	(bar)	(°)	(°)	(bar)	(bar)	(°)
1	0.3	0.31	1	30	1.9	0.8	0.9	90	90	8.2	2	38
2				27	2.2					18.04	5	32
3	Modulo di Young in funzione della profondità e della litologia delle formazioni			20	2.21					55.44	18	24
4 (*)				28	2.16					37.62	10	34
5				27	2.2					43.3	12	32
6				20	2.3					69.28	20	30
7				20	2.3					57.63	15	35
8				25	2.4					76.84	20	35
9				10	2.5					153.68	40	35
10				10	2.6					193.14	40	45

(*) classe *reservoir*

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

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

ALLEGATO B RISULTATI - *ADDENDUM*

Tab. B.1: Subsidenza massima stimata al pozzo Gradizza 1 per i vari casi analizzati, in corrispondenza dei primi *time-step* di simulazione successivi all'avvio della produzione (t_1 , 3 anni; t_2 , 6 anni; t_3 , 10 anni).

TIME-STEP	CASO STATICO		CASO DINAMICO	
	SPOSTAMENTO VERTICALE MAX [mm]	RAGGIO MAX [Km]	SPOSTAMENTO VERTICALE MAX [mm]	RAGGIO MAX [Km]
t_1	-4.3	2	-1.2	-
t_2	-7.8	3.4	-2.3	1.7
t_3	-11.7	4.6	-3.4	2.8

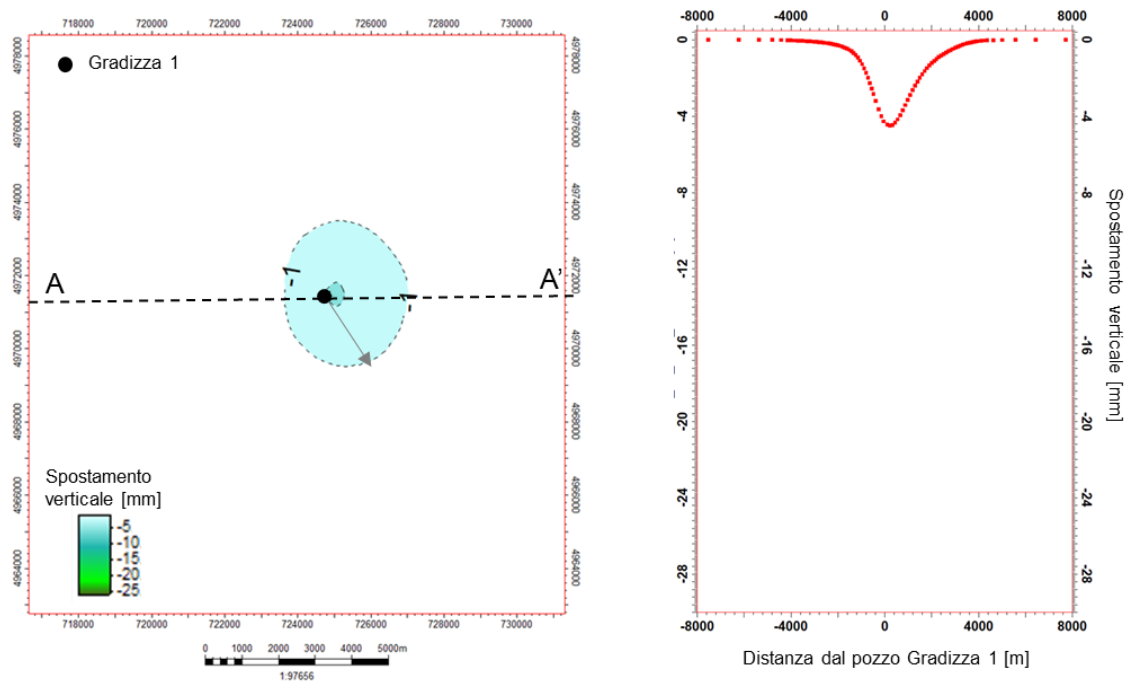


Fig. B.1: Caso statico - spostamento verticale indotto sul piano campagna dopo 3 anni di produzione (t_1): mappa (sinistra) e sezione AA' centrata al pozzo Gradizza 1 (destra).

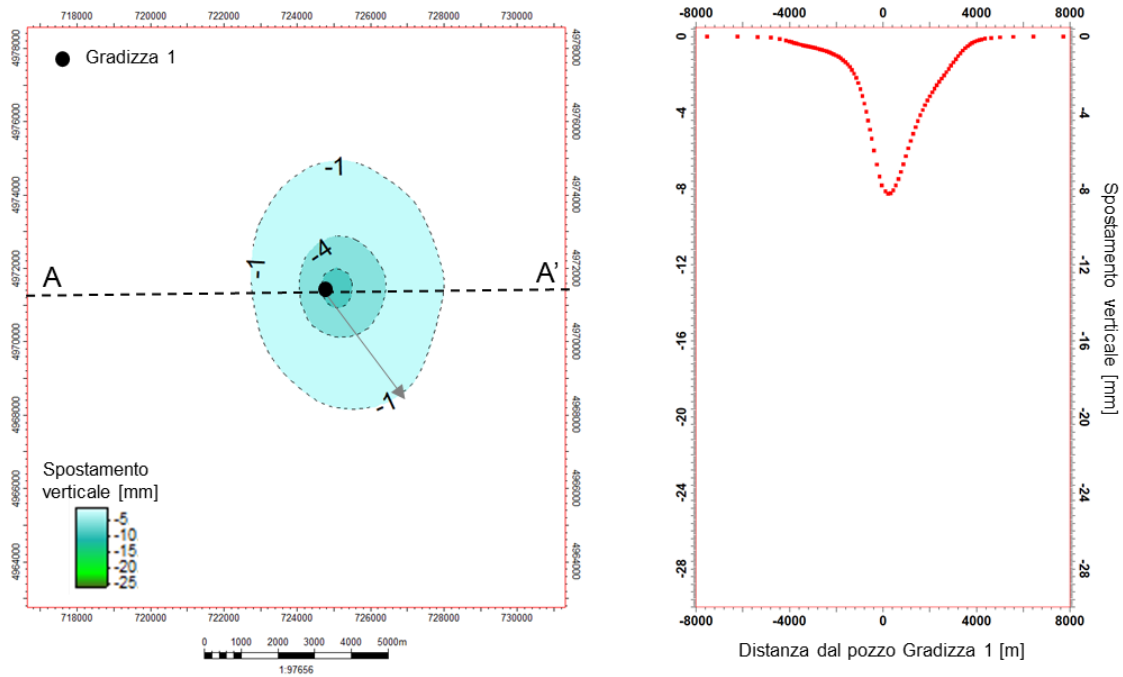


Fig. B.2: Caso statico - spostamento verticale indotto sul piano campagna dopo 6 anni di produzione (t_2): mappa (sinistra) e sezione AA' centrata al pozzo Gradizza 1 (destra).

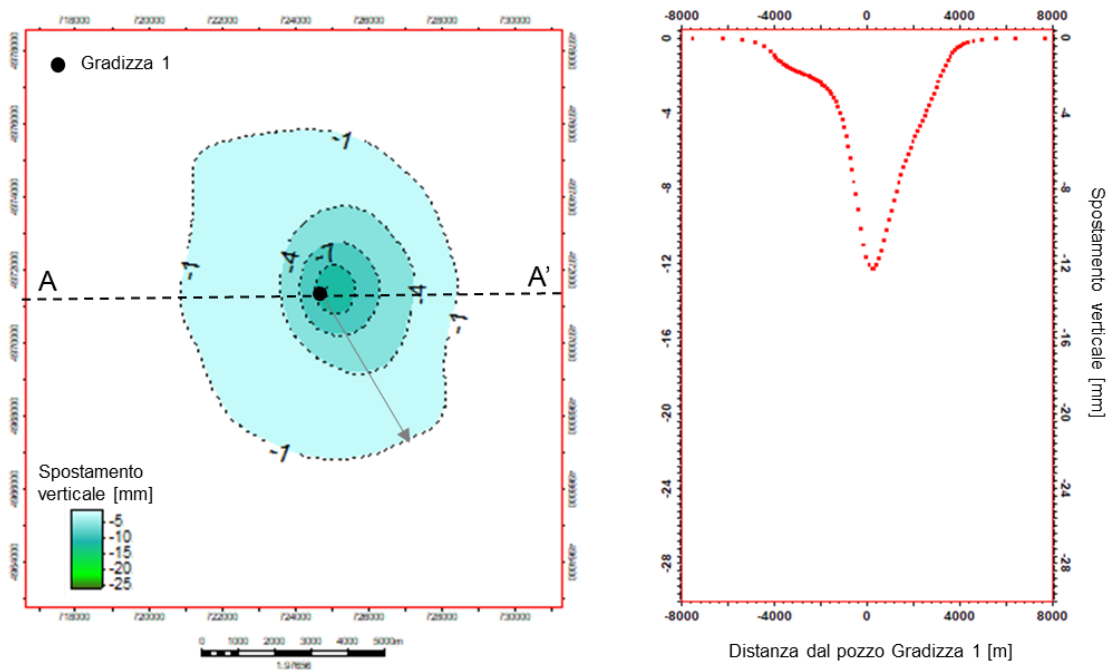


Fig. B.3: Caso statico - spostamento verticale indotto sul piano campagna dopo 10 anni di produzione (t_3): mappa (sinistra) e sezione AA' centrata al pozzo Gradizza 1 (destra).

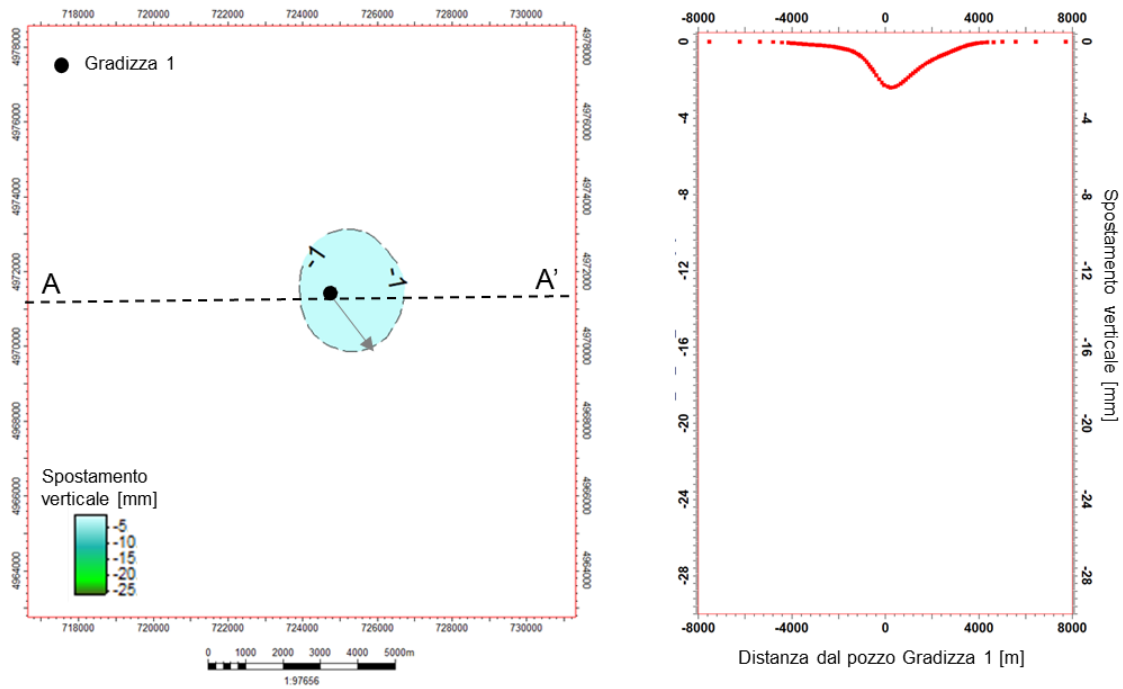


Fig. B.4: Caso dinamico - spostamento verticale indotto sul piano campagna dopo 6 anni di produzione (t_2): mappa (sinistra) e sezione AA' centrata al pozzo Gradizza 1 (destra).

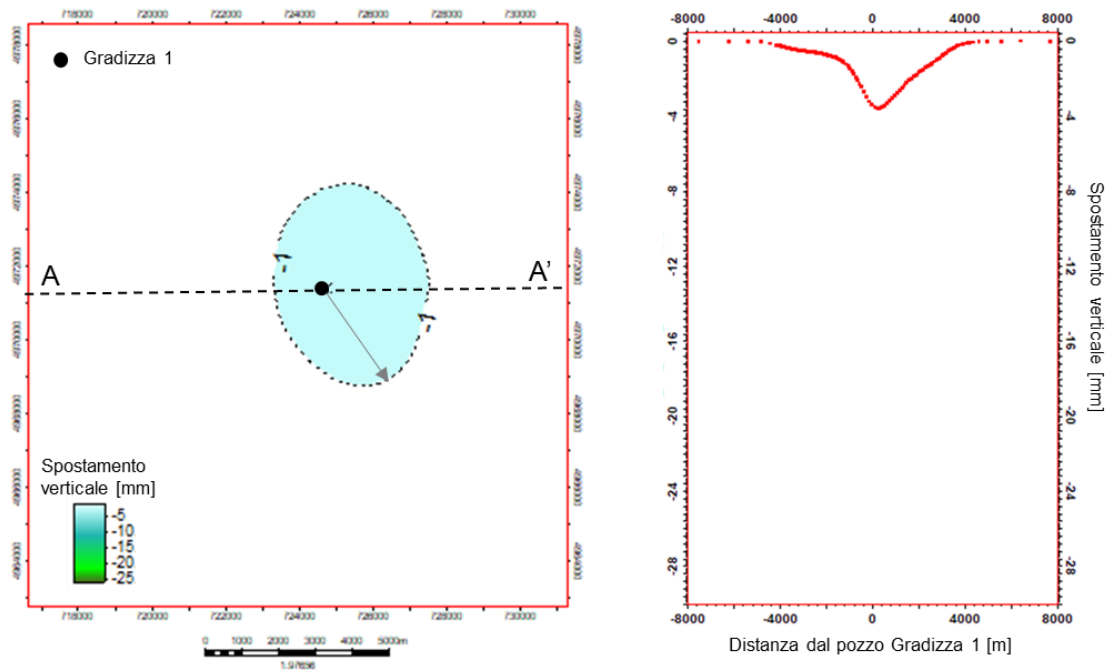


Fig. B.5: Caso dinamico - spostamento verticale indotto sul piano campagna dopo 10 anni di produzione (t_3): mappa (sinistra) e sezione AA' centrata al pozzo Gradizza 1 (destra).