



Campo di Anemone

Modello Geomeccanico di Subsidenza

Management Summary

Executive Summary

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo al campo di Anemone, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dall'attività estrattiva. Il modello geomeccanico utilizzato è 3D agli elementi finiti e, per descrivere il comportamento del materiale, è stata adottata una legge costitutiva elasto-viscoplastica. A fine simulazione, nel 2051 (31 anni dopo la fine della produzione, avvenuta a fine giugno 2020), la massima subsidenza attesa è pari a 48 cm. La distanza minima del fenomeno dalla linea di costa risulta pari a circa 12 km.

Data
31/12/2022



Indice

1.	Introduzione	3
2.	Dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS	4
3.	Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti	5
3.1.	Approccio metodologico	5
3.2.	Geometria del modello	6
3.3.	Proprietà dei materiali	8
3.3.1.	Densità della roccia	8
3.3.2.	Peso specifico dei fluidi saturanti	8
3.3.3.	Proprietà meccaniche	9
3.4.	Inizializzazione e storia di pressione	15
3.4.1.	Stato tensionale iniziale	15
3.4.2.	Storia di pressione	15
4.	Risultati delle simulazioni FEM	16
5.	Confronto con i dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS.....	19
	Bibliografia	20

1. Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo al campo di Anemone, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento e di prevederne l'evoluzione futura fino a 30 anni oltre la chiusura.

Il campo di Anemone si trova nel bacino settentrionale del mare Adriatico e ricade nella concessione di coltivazione A.C8.ME (Figura 1), con titolarità Eni 81% ed Energean 19% [1].

La piattaforma di produzione Anemone B si trova a circa 20 km in direzione Nord-Est rispetto alla costa di Rimini, dove la profondità del fondale marino è di circa 22 m.

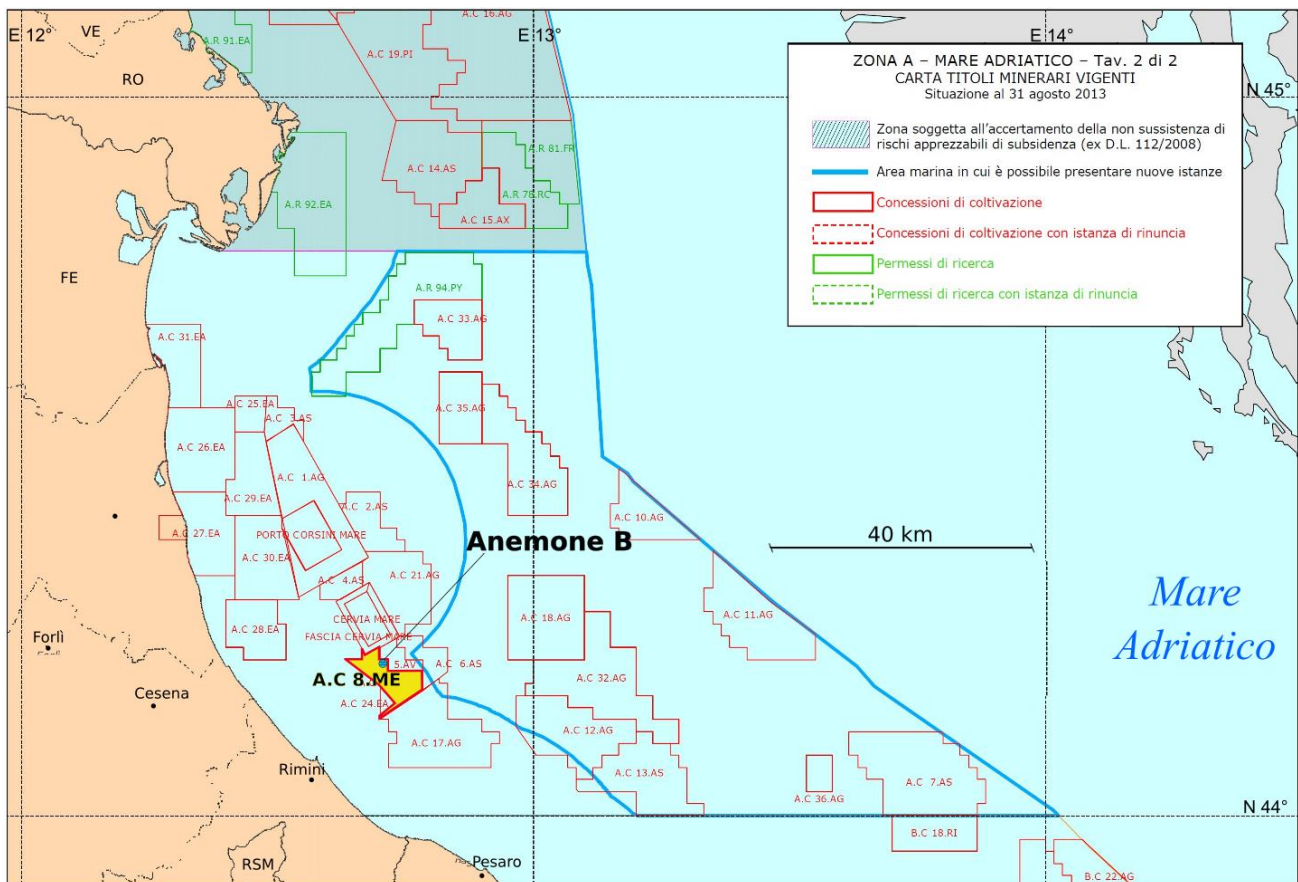


Figura 1 – Ubicazione della concessione di coltivazione A.C8.ME e della piattaforma di produzione Anemone B. La presente mappa è un'elaborazione dell'originale pubblicata dal Ministero dello Sviluppo Economico [1].

La valutazione della subsidenza per il campo di Anemone è stata effettuata con un modello geomeccanico 3D agli elementi finiti (FE), costruito utilizzando il codice di calcolo Abaqus [2]. Le informazioni relative alla geometria del giacimento, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dal modello fluidodinamico di giacimento [4] realizzato con il codice di calcolo alle differenze finite (FD) Eclipse [3].

Alcuni parametri caratteristici della legge costitutiva adottata per descrivere il comportamento del materiale sono stati calibrati in modo da riprodurre le variazioni altimetriche misurate, a partire dal 2007, dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma di produzione Anemone B (§2).

Il campo è chiuso alla produzione da fine giugno 2020.

2. Dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS

Sulla piattaforma di produzione Anemone B è installata una stazione CGPS in corrispondenza delle coordinate 2336692 km E e 4899913 km N. I valori di variazione altimetrica misurati dalla stazione sono stati utilizzati per calibrare alcuni parametri del modello geomeccanico.

Il periodo di osservazione va da agosto 2007 a giugno 2022 (Figura 2), per un totale di quasi 15 anni di misurazioni. La velocità media di subsidenza è pari a circa 4,3 mm/anno.

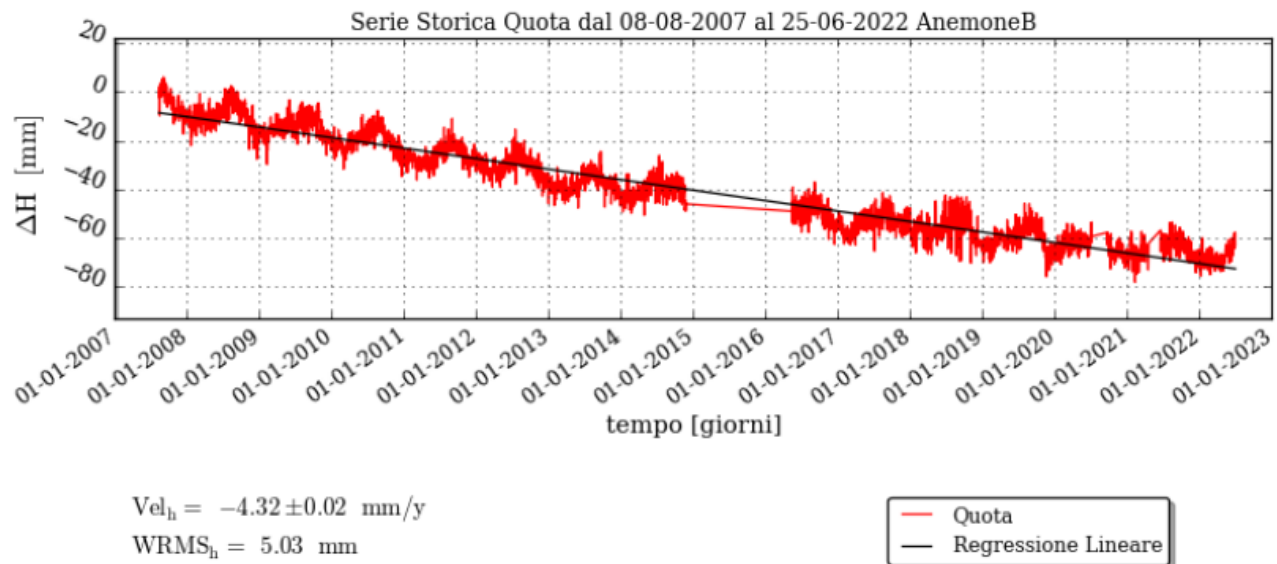


Figura 2 – Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS della piattaforma Anemone B, aggiornate al 25/06/2022

3. Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti

Lo studio geomeccanico di subsidenza è stato condotto con un modello numerico 3D agli elementi finiti (FE), costruito utilizzando il codice di calcolo Abaqus [2].

3.1. Approccio metodologico

La costruzione del modello geomeccanico è stata basata sulle seguenti informazioni derivanti dal modello fluidodinamico Eclipse [3]:

- mappe geologiche dei livelli interessati dal giacimento, estese in misura tale da descrivere interamente non solo le zone mineralizzate, ma anche gli acquiferi laterali idraulicamente connessi ai livelli produttivi;
- descrizione dettagliata di geometria, geologia e petrofisica dei livelli mineralizzati e degli acquiferi ad essi connessi idraulicamente, riprodotte con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica;
- distribuzione ed evoluzione temporale della pressione nei livelli mineralizzati e negli acquiferi ad essi connessi idraulicamente.

Per il calcolo del profilo di densità della roccia (§3.3.1), sono stati utilizzati i seguenti dati:

- *density log* registrati nei pozzi Anemone 3dirA, Anemone 9dir e Benedetta 1;
- *sonic log* registrato nel pozzo Anemone 1ver.

Invece, per la stima dei parametri caratterizzanti il comportamento meccanico della roccia secondo la legge costitutiva adottata nel modello geomeccanico (§3.3.3), sono state utilizzate le seguenti informazioni:

- risultati di prove di compressione eseguite in laboratorio su campioni di formazione geologica prelevati dal pozzo Anemone 3dir (§3.3.3), per una prima stima diretta;
- variazioni altimetriche registrate dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma di produzione Anemone B, per la successiva calibrazione di alcuni parametri caratteristici della legge costitutiva.

Si precisa che sia le simulazioni fluidodinamiche sia le simulazioni geomeccaniche sono state prolungate fino a gennaio 2051. Infatti, con le prime si è voluto valutare l'eventuale ripressurizzazione del giacimento dopo la fine della produzione (giugno 2020) per effetto dell'acquifero circostante, mentre con le seconde l'evoluzione della subsidenza nei 30 anni successivi alla fine della produzione del campo.



3.2. Geometria del modello

Il modello agli elementi finiti è stato costruito a partire dal modello fluido-dinamico alle differenze finite del sistema giacimento-acquifero. Il modello Eclipse è composto da 104x32 celle rispettivamente nelle direzioni I e J, per 209 livelli. Esso interessa un'area di circa 25x7 km² ed è costituito da un numero totale di celle pari a 695552, di cui 338035 attive.

Al fine di limitare il numero di gradi di libertà del modello geomeccanico, è stato effettuato un processo di *upscaling* orizzontale, andando ad accorpare celle tra loro adiacenti ed aventi un grado simile di saturazione a gas. Tale operazione ha prodotto un modello in cui ognuno dei 209 livelli del sistema giacimento-acquifero è composto da 39 elementi nella direzione I e 16 nella direzione J.

Per non risentire dell'influenza delle condizioni al contorno imposte ai bordi, il modello geomeccanico è stato esteso lateralmente (*sideburden*) fino a ricoprire un'area di circa 100x80 km². Tale estensione è stata realizzata con l'aggiunta, ad ognuno dei 209 livelli, di 40 elementi nella direzione I e 52 elementi nella direzione J.

La griglia originale, inoltre, è stata estesa verticalmente in modo da comprendere la regione che va dal fondale marino (22 mssl) fino ad una profondità di 8000 mssl. Il modello è stato diviso in 5 livelli dalla sommità del giacimento fino al fondale marino (*overburden*) e in 5 livelli dal fondo del giacimento fino alla base del modello (*underburden*).

La griglia FE risulta perciò costituita da 79x68x219 (1176468) elementi e 1214400 nodi, per un totale di 3768761 gradi di libertà. Esso si estende verticalmente da 22 a 8000 mssl ed in pianta copre un'area di 100x80 km² (Figura 3).

Le condizioni al contorno assegnate al modello sono di spostamento nullo alla base della griglia e di spostamento orizzontale impedito ai lati della griglia.

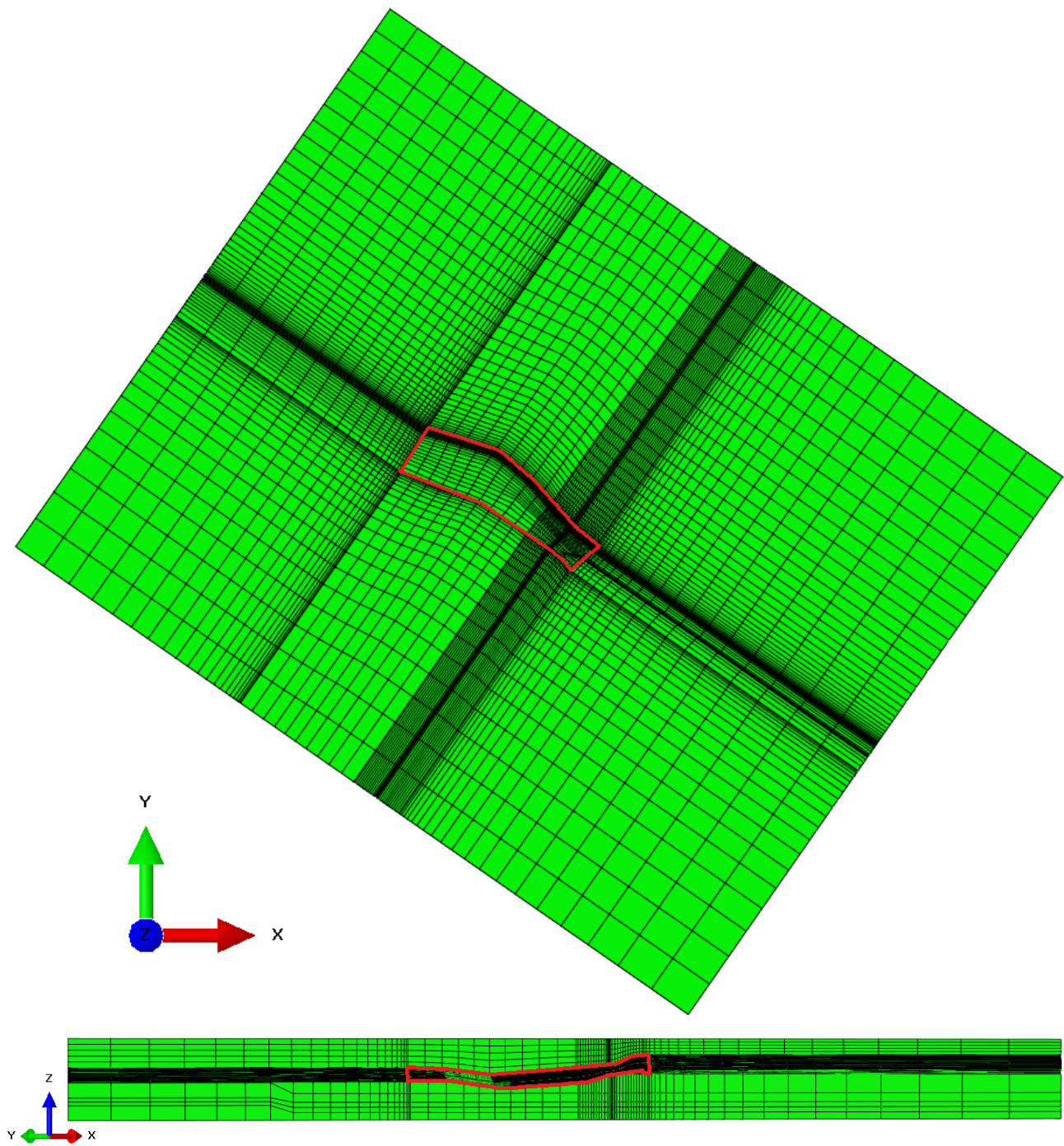


Figura 3 – Confronto tra l'estensione del modello geomeccanico e del modello fluidodinamico (riquadri rossi).

3.3. Proprietà dei materiali

3.3.1. Densità della roccia

Per mezzo dei *density log* registrati in tre pozzi (Anemone 3dirA, Anemone 9dir e Benedetta 1) e del *sonic log* registrato nel pozzo Anemone 1ver, è stato possibile ricavare il seguente profilo di densità ρ della roccia:

$$\rho(z) = 0.1324 \cdot (z - z_{fm}) + 2062.71 \quad (1)$$

in cui la profondità z è misurata in metri TVDSS (*True Vertical Depth Sub Sea*) e ρ in kg/m^3 , mentre la profondità del fondale marino z_{fm} è pari a 22 m (Figura 4). Per la densità dell'acqua marina è stato assunto il valore di 1030 kg/m^3 .

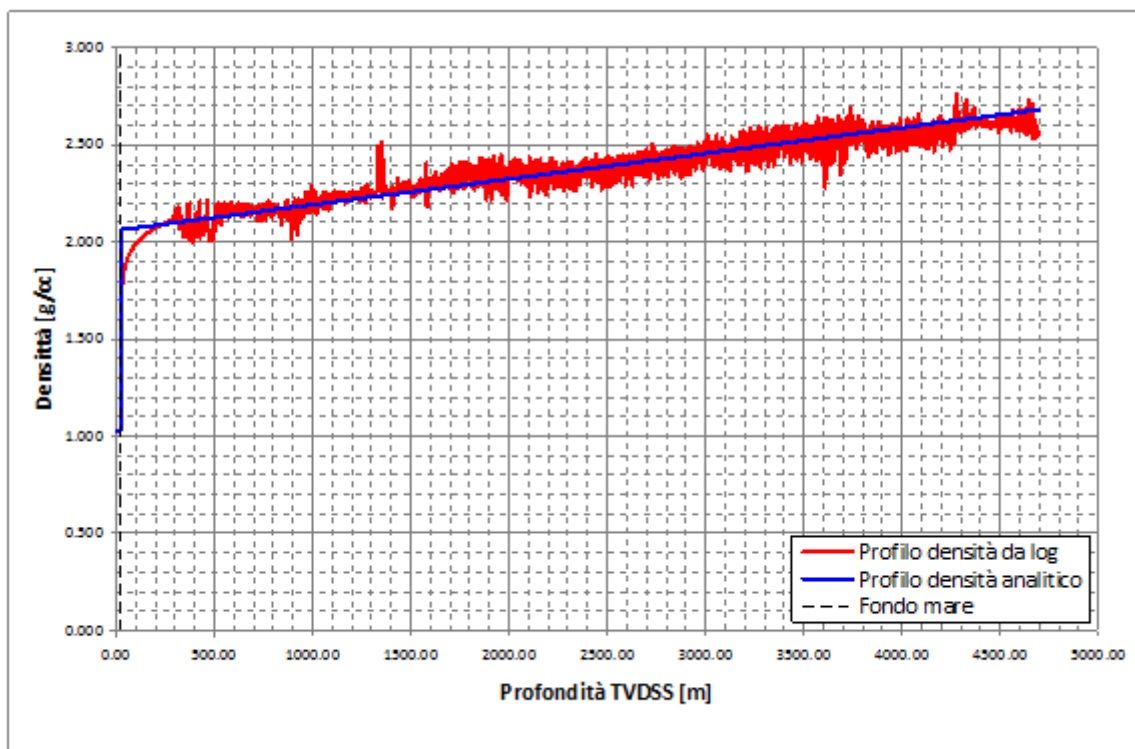


Figura 4 – Profilo di densità da log e analitico.

3.3.2. Peso specifico dei fluidi saturanti

Al modello FE viene fornito il valore del peso specifico dei fluidi saturanti. Per ogni regione idromeccanica il valore di γ_f (relativo al gas o all'acqua) è stato considerato costante. Esso è stato determinato partendo dalla profondità del contatto gas-acqua e dalla distribuzione iniziale delle pressioni calcolata dal modello Eclipse.

3.3.3. Proprietà meccaniche

Il comportamento meccanico del materiale costituente le formazioni geologiche è stato descritto secondo la legge costitutiva elasto-viscoplastica ‘Soft-Soil-Creep’ di Vermeer e Neher [5] (VNM), che è stata formulata arricchendo il classico modello elasto-plastico ‘Modified Cam-Clay Model’ [6] (MCCM) con la componente viscosa della deformazione. Evidenze sperimentali mostrano che materiali come quelli dei giacimenti dell’area adriatica possono presentare una risposta di tipo elasto-viscoplastico alle variazioni di sforzo efficace [7].

I seguenti parametri del VNM hanno un chiaro significato fisico e, fatta eccezione per l’indice di creep, sono analoghi a quelli del MCCM:

- λ^* indice di compressione modificato;
- κ^* indice di ricompressione modificato;
- μ^* indice di creep modificato;
- ν rapporto di Poisson;
- M pendenza della retta di stato critico;
- $pseudo-OCR_{ini-rif}$ grado di sovraconsolidazione iniziale.

I valori dei parametri λ^* e κ^* sono stati ottenuti direttamente dall’interpretazione dei risultati di prove di laboratorio effettuate su 8 campioni prelevati dal pozzo Anemone 3dir [8] e sono rispettivamente pari a $3.86e-2$ e $4.44e-3$.

Il valore di μ^* ottenuto sulla base delle medesime prove sperimentali è stato successivamente calibrato in modo da riprodurre accuratamente le misure registrate dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma di produzione Anemone B (§2). In seguito a tale operazione di calibrazione, il valore di μ^* utilizzato nel modello è pari a $1.21e-3$.

Per il rapporto di Poisson è stato utilizzato il valore 0.25, in accordo con dati di laboratorio del pozzo Anemone 11 dir. Infine, la pendenza M della linea di stato critico è stata posta pari a 1.33.

Non essendo possibile ricavare il valore del grado di consolidazione iniziale da prove di laboratorio, in prima approssimazione è stata ottenuta una stima analitica di questo parametro ipotizzando un *rate* di deformazione costante durante tutto il periodo di sedimentazione. Successivamente questo valore è stato calibrato in modo da riprodurre gli spostamenti osservati in corrispondenza della stazione CGPS. Il valore finale utilizzato per $pseudo-OCR_{ini-rif}$ è pari a 1.9.

Si precisa che gli interlayer inattivi nel modello fluidodinamico e le regioni di *over-*, *under-* e *side-burden* sono descritti come mezzi elastici lineari, approssimazione più che sufficiente dal momento che in tali intervalli non sono presenti variazioni di pressione dovute alla produzione. Questi vengono caratterizzati attraverso la comprimibilità edometrica c_m del materiale, calcolata come segue:

$$c_m = \kappa^* / \sigma'_v \quad (2)$$

dove σ'_v è la tensione efficace verticale, definita come la differenza tra la tensione totale verticale e la pressione dei pori p :

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad (3)$$

La pressione dei pori p è stata estratta dallo studio fluidodinamico alla profondità di riferimento, mentre la tensione verticale totale σ_v è stata calcolata a partire dalla densità del materiale espressa attraverso la relazione riportata in §3.3.1.

Per la caratterizzazione meccanica delle formazioni carbonatiche e marnoso-gessose presenti nell'*underburden*, invece, si è fatto riferimento alle informazioni disponibili per degli analoghi. Sono stati assegnati i seguenti valori di c_m e rapporto di Poisson: $2.77e-6 \text{ bar}^{-1}$ e 0.35 per i carbonati, $4.80e-6 \text{ bar}^{-1}$ e 0.25 per marne e gessi.

Si sottolinea che il campo di pressione del modello Eclipse è stato stimato utilizzando comprimibilità dei pori coerenti con la comprimibilità edometrica c_m del modello geomeccanico.

In **Tabella 1** si riportano i valori dei parametri meccanici utilizzati nel modello geomeccanico per ciascuno dei 219 livelli.

LIVELLO GEOLOGICO	Eclipse Layer		Abaqus Layer	z media [m]	p [bar]	σ_v [bar]	σ'_v [bar]	c_m [bar ⁻¹]	ν -	E [bar]
	0/1 flag	number								
<i>Overburden</i>			OVB1	470.8	47.6	94.3	46.8	9.50E-05	0.25	8.77E+03
			OVB2	919.6	92.9	189.0	96.1	4.62E-05	0.25	1.80E+04
			OVB3	1368.4	138.2	286.3	148.1	3.00E-05	0.25	2.78E+04
			OVB4	1817.1	183.6	386.3	202.7	2.19E-05	0.25	3.81E+04
			OVB5	2265.9	228.9	488.8	260.0	1.71E-05	0.25	4.87E+04
PL1-D1	1	1	2714.7	297.4	594.0	296.6	1.50E-05	0.25	5.56E+04	
interlayer	0	2	-	-	-	295.7	1.50E-05	0.25	5.55E+04	
PL1-E	0	3	2723.2	300.3	596.0	295.7	1.50E-05	0.25	5.55E+04	
PL1-Ea	1	4	2731.7	303.2	598.0	294.8	1.51E-05	0.25	5.53E+04	
PL1-E1	1	5	2737.0	304.0	599.3	295.4	1.50E-05	0.25	5.54E+04	
PL1-E1a	1	6	2744.1	303.7	601.0	297.3	1.49E-05	0.25	5.58E+04	
interlayer	0	7	-	-	-	297.3	1.49E-05	0.25	5.58E+04	
PL1-F	1	8	2757.3	303.1	604.1	301.0	1.48E-05	0.25	5.65E+04	
interlayer	0	9	-	-	-	301.9	1.47E-05	0.25	5.66E+04	
PL1-G	1	10	2767.1	303.7	606.5	302.8	1.47E-05	0.25	5.68E+04	
interlayer	0	11	-	-	-	304.6	1.46E-05	0.25	5.71E+04	
PL1-H	1	12	2780.7	303.4	609.7	306.3	1.45E-05	0.25	5.75E+04	
interlayer	0	13	-	-	-	306.3	1.45E-05	0.25	5.75E+04	
PL1-H1	1	14	2789.6	303.2	611.8	308.7	1.44E-05	0.25	5.79E+04	
interlayer	0	15	-	-	-	310.5	1.43E-05	0.25	5.83E+04	
PL1-H3	1	16	2808.0	303.8	616.2	312.4	1.42E-05	0.25	5.86E+04	
interlayer	0	17	-	-	-	313.0	1.42E-05	0.25	5.87E+04	
PL1-H4	1	18	2813.3	304.0	617.5	313.5	1.42E-05	0.25	5.88E+04	
interlayer	0	19	-	-	-	312.3	1.42E-05	0.25	5.86E+04	
PL1-I_1	1	20	2829.5	310.3	621.3	311.1	1.43E-05	0.25	5.84E+04	
interlayer	0	21	-	-	-	311.1	1.43E-05	0.25	5.84E+04	
PL1-I_2	1	22	2829.5	310.3	621.3	311.1	1.43E-05	0.25	5.84E+04	
PL1-I_3	1	23	2829.5	310.3	621.3	311.1	1.43E-05	0.25	5.84E+04	
PL1-I_4	1	24	2833.1	309.9	622.2	312.3	1.42E-05	0.25	5.86E+04	
interlayer	0	25	-	-	-	312.8	1.42E-05	0.25	5.87E+04	
PL1-I1	1	26	2837.8	310.1	623.3	313.2	1.42E-05	0.25	5.88E+04	



interlayer	0	27	-	-	-	314.1	1.41E-05	0.25	5.89E+04
PL1-J_1	1	28	2847.1	310.6	625.5	314.9	1.41E-05	0.25	5.91E+04
interlayer	0	29	-	-	-	314.9	1.41E-05	0.25	5.91E+04
PL1-J_2	1	30	2851.3	310.1	626.5	316.4	1.40E-05	0.25	5.94E+04
interlayer	0	31	-	-	-	317.6	1.40E-05	0.25	5.96E+04
PL1-J_3	1	32	2857.1	309.2	627.9	318.8	1.39E-05	0.25	5.98E+04
interlayer	0	33	-	-	-	315.3	1.41E-05	0.25	5.91E+04
PL1-K_1	1	34	2874.6	320.3	632.1	311.8	1.42E-05	0.25	5.85E+04
PL1-K_2	1	35	2874.6	320.3	632.1	311.8	1.42E-05	0.25	5.85E+04
interlayer	0	36	-	-	-	313.5	1.42E-05	0.25	5.88E+04
PL1-K_3	1	37	2890.1	320.6	635.8	315.2	1.41E-05	0.25	5.91E+04
PL1-K_4	1	38	2890.1	320.6	635.8	315.2	1.41E-05	0.25	5.91E+04
PL1-K_5	1	39	2899.3	320.8	638.0	317.3	1.40E-05	0.25	5.95E+04
interlayer	0	40	-	-	-	320.5	1.39E-05	0.25	6.01E+04
PL1-L_1	1	41	2926.6	320.9	644.6	323.7	1.37E-05	0.25	6.07E+04
interlayer	0	42	-	-	-	325.6	1.36E-05	0.25	6.11E+04
PL1-L_2	1	43	2946.1	321.8	649.3	327.5	1.36E-05	0.25	6.14E+04
interlayer	0	44	-	-	-	328.4	1.35E-05	0.25	6.16E+04
PL1-L_3	1	45	2954.7	322.0	651.3	329.4	1.35E-05	0.25	6.18E+04
interlayer	0	46	-	-	-	330.4	1.34E-05	0.25	6.20E+04
PL1-M_1	1	47	2966.4	322.7	654.1	331.4	1.34E-05	0.25	6.22E+04
PL1-M_2	1	48	2979.5	323.9	657.3	333.4	1.33E-05	0.25	6.25E+04
interlayer	0	49	-	-	-	333.4	1.33E-05	0.25	6.25E+04
PL1-N	1	50	2997.4	330.7	661.6	331.0	1.34E-05	0.25	6.21E+04
interlayer	0	51	-	-	-	331.0	1.34E-05	0.25	6.21E+04
PL1-N1	1	52	3006.7	331.6	663.8	332.3	1.34E-05	0.25	6.23E+04
interlayer	0	53	-	-	-	333.1	1.33E-05	0.25	6.25E+04
PL1-N2	1	54	3014.0	331.6	665.6	334.0	1.33E-05	0.25	6.27E+04
interlayer	0	55	-	-	-	335.2	1.33E-05	0.25	6.29E+04
PL1-O_1	1	56	3026.1	332.2	668.5	336.3	1.32E-05	0.25	6.31E+04
interlayer	0	57	-	-	-	339.0	1.31E-05	0.25	6.36E+04
PL1-O_2	1	58	3047.4	332.0	673.7	341.6	1.30E-05	0.25	6.41E+04
PL1-O_3	1	59	3047.4	332.0	673.7	341.6	1.30E-05	0.25	6.41E+04
PL1-O_4	1	60	3061.4	333.9	677.1	343.1	1.29E-05	0.25	6.44E+04
interlayer	0	61	-	-	-	340.8	1.30E-05	0.25	6.39E+04
PL1-P	1	62	3083.7	343.9	682.4	338.5	1.31E-05	0.25	6.35E+04
interlayer	0	63	-	-	-	338.5	1.31E-05	0.25	6.35E+04
PL1-Pa	1	64	3083.7	343.9	682.4	338.5	1.31E-05	0.25	6.35E+04
interlayer	0	65	-	-	-	339.8	1.31E-05	0.25	6.37E+04
PL1-P1	1	66	3110.0	347.7	688.8	341.1	1.30E-05	0.25	6.40E+04
interlayer	0	67	-	-	-	344.3	1.29E-05	0.25	6.46E+04
PL1-Q_1	1	68	3135.9	347.6	695.1	347.5	1.28E-05	0.25	6.52E+04
PL1-Q_2	1	69	3135.9	347.6	695.1	347.5	1.28E-05	0.25	6.52E+04
interlayer	0	70	-	-	-	347.7	1.28E-05	0.25	6.52E+04



PL1-R_1	1	71	3149.1	350.4	698.3	347.9	1.28E-05	0.25	6.53E+04
PL1-R_2	1	72	3157.2	350.3	700.3	350.0	1.27E-05	0.25	6.57E+04
interlayer	0	73	-	-	-	350.3	1.27E-05	0.25	6.57E+04
PL1-Sa	1	74	3180.0	355.6	705.8	350.3	1.27E-05	0.25	6.57E+04
PL1-Sb	1	75	3180.0	355.6	705.8	350.3	1.27E-05	0.25	6.57E+04
interlayer	0	76	-	-	-	353.0	1.26E-05	0.25	6.62E+04
PL1-S_1	1	77	3202.5	355.6	711.3	355.7	1.25E-05	0.25	6.67E+04
interlayer	0	78	-	-	-	355.0	1.25E-05	0.25	6.66E+04
PL1-S_2a	1	79	3207.8	358.3	712.6	354.3	1.25E-05	0.25	6.65E+04
interlayer	0	80	-	-	-	355.0	1.25E-05	0.25	6.66E+04
PL1-S_2b	1	81	3214.8	358.5	714.3	355.8	1.25E-05	0.25	6.67E+04
interlayer	0	82	-	-	-	356.2	1.25E-05	0.25	6.68E+04
PL1-Ta	1	83	3238.1	363.4	720.0	356.5	1.25E-05	0.25	6.69E+04
PL1-Tb	1	84	3238.1	363.4	720.0	356.5	1.25E-05	0.25	6.69E+04
PL1-Tc	1	85	3238.1	363.4	720.0	356.5	1.25E-05	0.25	6.69E+04
interlayer	0	86	-	-	-	359.7	1.23E-05	0.25	6.75E+04
PL1-T_1a	1	87	3274.6	366.0	728.9	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
PL1-T_1b	1	88	3274.6	366.0	728.9	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
interlayer	0	89	-	-	-	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
PL1-U_1	1	90	3274.6	366.0	728.9	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
interlayer	0	91	-	-	-	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
PL1-U_2	1	92	3274.6	366.0	728.9	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
interlayer	0	93	-	-	-	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
PL1-U_3	1	94	3274.6	366.0	728.9	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
interlayer	0	95	-	-	-	364.7	1.22E-05	0.25	6.84E+04
PL1-V_1	1	96	3325.3	374.9	741.3	366.5	1.21E-05	0.25	6.87E+04
PL1-V_2	1	97	3325.3	374.9	741.3	366.5	1.21E-05	0.25	6.87E+04
PL1-V_3	1	98	3342.7	375.6	745.6	369.9	1.20E-05	0.25	6.94E+04
interlayer	0	99	-	-	-	370.2	1.20E-05	0.25	6.95E+04
PL1-Z	1	100	3365.9	380.7	751.3	370.6	1.20E-05	0.25	6.95E+04
interlayer	0	101	-	-	-	371.3	1.20E-05	0.25	6.96E+04
PL-A	1	102	3385.1	384.0	756.0	372.0	1.19E-05	0.25	6.98E+04
interlayer	0	103	-	-	-	372.0	1.19E-05	0.25	6.98E+04
PL-B_1	1	104	3399.5	387.6	759.5	372.0	1.19E-05	0.25	6.98E+04
interlayer	0	105	-	-	-	369.6	1.20E-05	0.25	6.93E+04
PL-B_2	1	106	3423.8	398.3	765.5	367.3	1.21E-05	0.25	6.89E+04
interlayer	0	107	-	-	-	369.5	1.20E-05	0.25	6.93E+04
PL-B_3	1	108	3445.5	399.2	770.9	371.7	1.19E-05	0.25	6.97E+04
interlayer	0	109	-	-	-	374.0	1.19E-05	0.25	7.02E+04
PL-B1	1	110	3464.8	399.3	775.6	376.3	1.18E-05	0.25	7.06E+04
interlayer	0	111	-	-	-	377.5	1.18E-05	0.25	7.08E+04
PL-B2	1	112	3492.3	403.8	782.4	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04
interlayer	0	113	-	-	-	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04
PL-C_1	1	114	3492.3	403.8	782.4	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04



interlayer	0	115	-	-	-	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04
PL-C_2	1	116	3492.3	403.8	782.4	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04
PL-C_3	1	117	3492.3	403.8	782.4	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04
interlayer	0	118	-	-	-	379.8	1.17E-05	0.25	7.13E+04
PL-D	1	119	3515.3	407.1	788.1	381.0	1.17E-05	0.25	7.15E+04
interlayer	0	120	-	-	-	381.4	1.16E-05	0.25	7.16E+04
PL-E	1	121	3531.3	410.3	792.1	381.8	1.16E-05	0.25	7.16E+04
interlayer	0	122	-	-	-	388.6	1.14E-05	0.25	7.29E+04
PL-F_1	1	123	3562.1	411.1	799.7	388.6	1.14E-05	0.25	7.29E+04
PL-F_2	1	124	3562.1	411.1	799.7	388.6	1.14E-05	0.25	7.29E+04
interlayer	0	125	-	-	-	384.9	1.15E-05	0.25	7.22E+04
PL-G_1	1	126	3605.7	429.4	810.6	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
PL-G_2	1	127	3605.7	429.4	810.6	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
interlayer	0	128	-	-	-	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
PL-H	1	129	3605.7	429.4	810.6	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
interlayer	0	130	-	-	-	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
PL-I_1	1	131	3605.7	429.4	810.6	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
interlayer	0	132	-	-	-	384.7	1.15E-05	0.25	7.22E+04
PL-I_2	1	133	3638.7	430.6	818.8	388.2	1.14E-05	0.25	7.28E+04
PL-I_3	1	134	3638.7	430.6	818.8	388.2	1.14E-05	0.25	7.28E+04
interlayer	0	135	-	-	-	388.2	1.14E-05	0.25	7.28E+04
PL-II	1	136	3654.1	431.2	822.6	391.5	1.13E-05	0.25	7.34E+04
interlayer	0	137	-	-	-	390.7	1.14E-05	0.25	7.33E+04
PL-J_1	1	138	3667.6	436.1	826.0	389.9	1.14E-05	0.25	7.32E+04
PL-J_2	1	139	3667.6	436.1	826.0	389.9	1.14E-05	0.25	7.32E+04
interlayer	0	140	-	-	-	391.3	1.14E-05	0.25	7.34E+04
PL-J_3	1	141	3697.2	440.6	833.4	392.8	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J_4	1	142	3697.2	440.6	833.4	392.8	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J_5	1	143	3697.2	440.6	833.4	392.8	1.13E-05	0.25	7.37E+04
interlayer	0	144	-	-	-	392.8	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J_6	1	145	3733.2	449.6	842.4	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
interlayer	0	146	-	-	-	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J1_1	1	147	3733.2	449.6	842.4	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J1_2	1	148	3733.2	449.6	842.4	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
interlayer	0	149	-	-	-	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J2_1	1	150	3733.2	449.6	842.4	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J2_2	1	151	3753.9	451.8	847.6	395.8	1.12E-05	0.25	7.43E+04
interlayer	0	152	-	-	-	395.8	1.12E-05	0.25	7.43E+04
PL-K	1	153	3774.6	451.4	852.8	401.4	1.11E-05	0.25	7.53E+04
interlayer	0	154	-	-	-	401.4	1.11E-05	0.25	7.53E+04
PL-K1_1	1	155	3774.6	451.4	852.8	401.4	1.11E-05	0.25	7.53E+04
PL-K1_2	1	156	3791.2	453.0	857.0	403.9	1.10E-05	0.25	7.58E+04
interlayer	0	157	-	-	-	403.9	1.10E-05	0.25	7.58E+04
PL-L_1	1	158	3791.2	453.0	857.0	403.9	1.10E-05	0.25	7.58E+04



interlayer	0	159	-	-	-	404.2	1.10E-05	0.25	7.58E+04
PL-L_2	1	160	3811.5	457.8	862.1	404.2	1.10E-05	0.25	7.58E+04
PL-L_3	1	161	3836.8	483.0	868.4	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
interlayer	0	162	-	-	-	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
PL-M_1	1	163	3836.8	483.0	868.4	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
interlayer	0	164	-	-	-	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
PL-M_2	1	165	3836.8	483.0	868.4	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
PL-M_3	1	166	3836.8	483.0	868.4	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
interlayer	0	167	-	-	-	390.2	1.14E-05	0.25	7.32E+04
PL-N_0	1	168	3855.9	483.0	873.2	390.2	1.14E-05	0.25	7.32E+04
interlayer	0	169	-	-	-	393.4	1.13E-05	0.25	7.38E+04
PL-N_1	1	170	3868.6	483.1	876.4	393.4	1.13E-05	0.25	7.38E+04
PL-N_2	1	171	3868.6	483.1	876.4	393.4	1.13E-05	0.25	7.38E+04
PL-N_3	1	172	3868.6	483.1	876.4	393.4	1.13E-05	0.25	7.38E+04
interlayer	0	173	-	-	-	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
PL-N_4	1	174	3896.3	486.0	883.4	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
PL-N_5	1	175	3896.3	486.0	883.4	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
interlayer	0	176	-	-	-	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
PL-O_1	1	177	3896.3	486.0	883.4	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
PL-O_2	1	178	3896.3	486.0	883.4	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
interlayer	0	179	-	-	-	402.4	1.10E-05	0.25	7.55E+04
PL-O_3	1	180	3919.4	486.9	889.3	402.4	1.10E-05	0.25	7.55E+04
interlayer	0	181	-	-	-	402.4	1.10E-05	0.25	7.55E+04
PL-P_1	1	182	3933.5	495.7	892.8	397.1	1.12E-05	0.25	7.45E+04
interlayer	0	183	-	-	-	397.1	1.12E-05	0.25	7.45E+04
PL-P_2	1	184	3949.3	495.2	896.8	401.6	1.11E-05	0.25	7.53E+04
interlayer	0	185	-	-	-	401.6	1.11E-05	0.25	7.53E+04
PL-P_3	1	186	3958.2	495.5	899.1	403.6	1.10E-05	0.25	7.57E+04
interlayer	0	187	-	-	-	405.6	1.10E-05	0.25	7.61E+04
PL-Q_1	1	188	3973.3	497.3	902.9	405.6	1.10E-05	0.25	7.61E+04
interlayer	0	189	-	-	-	405.6	1.10E-05	0.25	7.61E+04
PL-Q_2	1	190	3987.5	498.4	906.5	408.2	1.09E-05	0.25	7.66E+04
interlayer	0	191	-	-	-	408.2	1.09E-05	0.25	7.66E+04
PL-R_1	1	192	4017.2	499.9	914.1	414.2	1.07E-05	0.25	7.77E+04
PL-R_2	1	193	4017.2	499.9	914.1	414.2	1.07E-05	0.25	7.77E+04
PL-R_3	1	194	4017.2	499.9	914.1	414.2	1.07E-05	0.25	7.77E+04
interlayer	0	195	-	-	-	417.3	1.06E-05	0.25	7.83E+04
PL-S_1	1	196	4044.2	500.5	920.9	420.5	1.06E-05	0.25	7.89E+04
interlayer	0	197	-	-	-	418.6	1.06E-05	0.25	7.85E+04
PL-S_2	1	198	4059.4	508.1	924.8	416.7	1.07E-05	0.25	7.82E+04
PL-S_3	1	199	4072.7	508.1	928.2	420.1	1.06E-05	0.25	7.88E+04
interlayer	0	200	-	-	-	421.3	1.05E-05	0.25	7.90E+04
PL-T_1	1	201	4084.4	508.6	931.2	422.6	1.05E-05	0.25	7.93E+04
interlayer	0	202	-	-	-	422.2	1.05E-05	0.25	7.92E+04

PL-T_2	1	203	4091.2	511.1	932.9	421.8	1.05E-05	0.25	7.91E+04
interlayer	0	204	-	-	-	423.3	1.05E-05	0.25	7.94E+04
PL-T_3	1	205	4108.5	512.5	937.3	424.8	1.05E-05	0.25	7.97E+04
interlayer	0	206	-	-	-	424.8	1.05E-05	0.25	7.97E+04
PL-T_4	1	207	4124.1	514.4	941.3	426.9	1.04E-05	0.25	8.01E+04
interlayer	0	208	-	-	-	429.5	1.03E-05	0.25	8.06E+04
PL-U	0	209	4134.1	514.4	943.9	429.5	1.03E-05	0.25	8.06E+04
<i>Underburden</i>		UDB1 (marne)	4770.1	481.8	1109.1	627.3	4.80E-06	0.25	1.74E+05
		UDB2 (marne)	5416.1	547.1	1282.3	735.2	4.80E-06	0.25	1.74E+05
		UDB2 (carbo)					2.77E-06	0.35	2.25E+05
		UDB3 (marne)	6062.1	612.3	1461.0	848.6	4.80E-06	0.25	1.74E+05
		UDB3 (carbo)					2.77E-06	0.35	2.25E+05
		UDB4 (marne)	6708.0	677.6	1645.0	967.4	4.80E-06	0.25	1.74E+05
		UDB4 (carbo)					2.77E-06	0.35	2.25E+05
		UDB5	7354.0	742.8	1834.5	1091.7	2.77E-06	0.35	2.25E+05

Tabella 1 – Proprietà dei materiali assegnate ad ogni layer.

3.4. Inizializzazione e storia di pressione

3.4.1. Stato tensionale iniziale

Per il campo di Anemone, lo sforzo totale verticale σ_v è stato calcolato dal gradiente di *overburden* definito a partire da log sonici e di densità, come descritto in §3.3.1.

Lo sforzo orizzontale efficace σ'_h è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico, definite come segue:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (4)$$

dove K_0 rappresenta il coefficiente di spinta a riposo, che è stato posto pari a 0.54 [9]. Inoltre, è stata formulata l'assunzione che lo stato tensionale sia isotropo nel piano orizzontale.

3.4.2. Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello fluidodinamico EclipseTM, è stata importata nel modello agli elementi finiti.

Le pressioni sono state importate in 70 step temporali, selezionati in modo tale che non si verificassero eccessive variazioni di pressione tra due intervalli successivi.

4. Risultati delle simulazioni FEM

In questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti dalle simulazioni geomeccaniche agli elementi finiti. Il fenomeno di subsidenza viene descritto sinteticamente attraverso tre indici:

1. la subsidenza massima;
2. l'estensione massima, definita come la massima distanza del punto di massimo dalla linea di iso-subsidenza dei 2 cm – considerata come limite areale del fenomeno;
3. la distanza minima della linea di iso-subsidenza dei 2 cm dalla costa.

Le previsioni di subsidenza fornite dal modello elasto-viscoplastico agli elementi finiti sono riportate in **Tabella 2** per tre step temporali: giugno 2020 (fine produzione), gennaio 2030 e gennaio 2051 (fine simulazione). Lo studio, infatti, è stato protratto per ulteriori 30 anni dopo la chiusura del campo alla produzione, al fine di considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.

Data	Subsidenza Punto di Max (cm)	Estensione Max (km)	Distanza Min da Costa (km)
giugno 2020	46	9	12
gennaio 2030	47	10	12
gennaio 2051	48	11	12

Tabella 2 – Indici caratteristici del fenomeno di subsidenza previsto dal modello geomeccanico.

L'analisi dei risultati consente di osservare quanto segue:

- il valore di massima subsidenza è pari a 48 cm e si registra alla fine della simulazione (gennaio 2051). Tale valore risulta localizzato nel punto (denominato punto di massimo) di coordinate 2335691 m E, 4898256 m N, che si trova a circa 3 km dalla piattaforma Anemone B. In Figura 5 si riporta l'evoluzione nel tempo della subsidenza relativa al punto di massimo;
- la massima estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm è in direzione Nord-Ovest rispetto al punto di massimo: a fine produzione (giugno 2020) è pari a circa 9 km (Figura 6), mentre raggiunge gli 11 km al termine della simulazione (Figura 7);
- come dimostra l'analisi dell'evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm (Figura 8), l'area interessata dal fenomeno subsidenziale risulta in fase di stabilizzazione in direzione della costa. In particolare, il fenomeno si esaurisce a circa 12 km dalla linea di costa di Rimini.

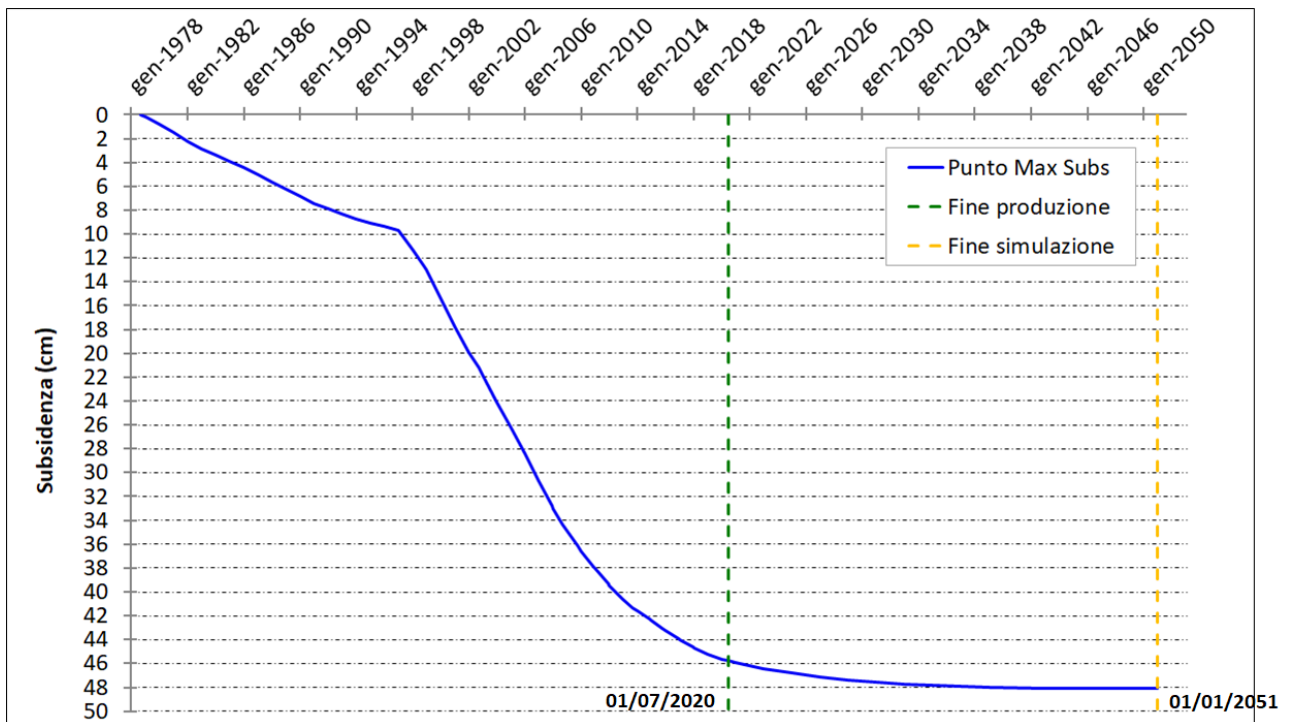


Figura 5 – Evoluzione temporale della subsidenza nel punto di massimo.

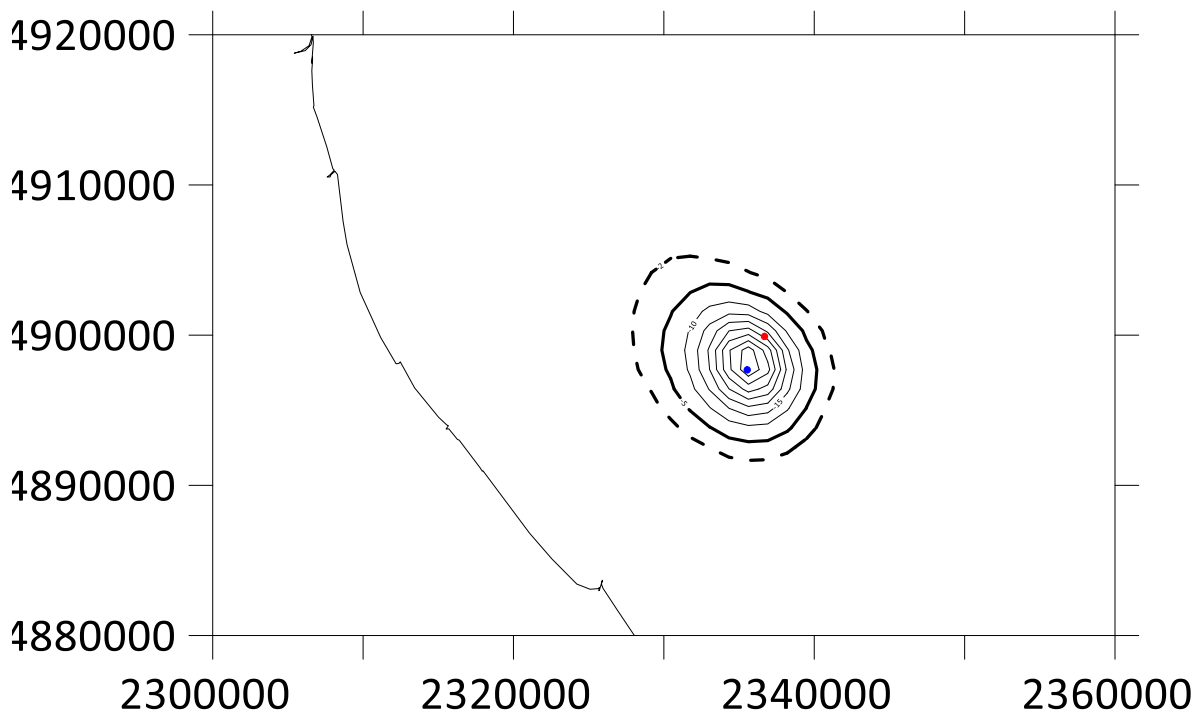


Figura 6 – Curve di iso-subsidenza (curva dei 2 cm tratteggiata) a fine produzione (giugno 2020). In blu è riportata la posizione del punto di massimo, in rosso la posizione della piattaforma Anemone B.

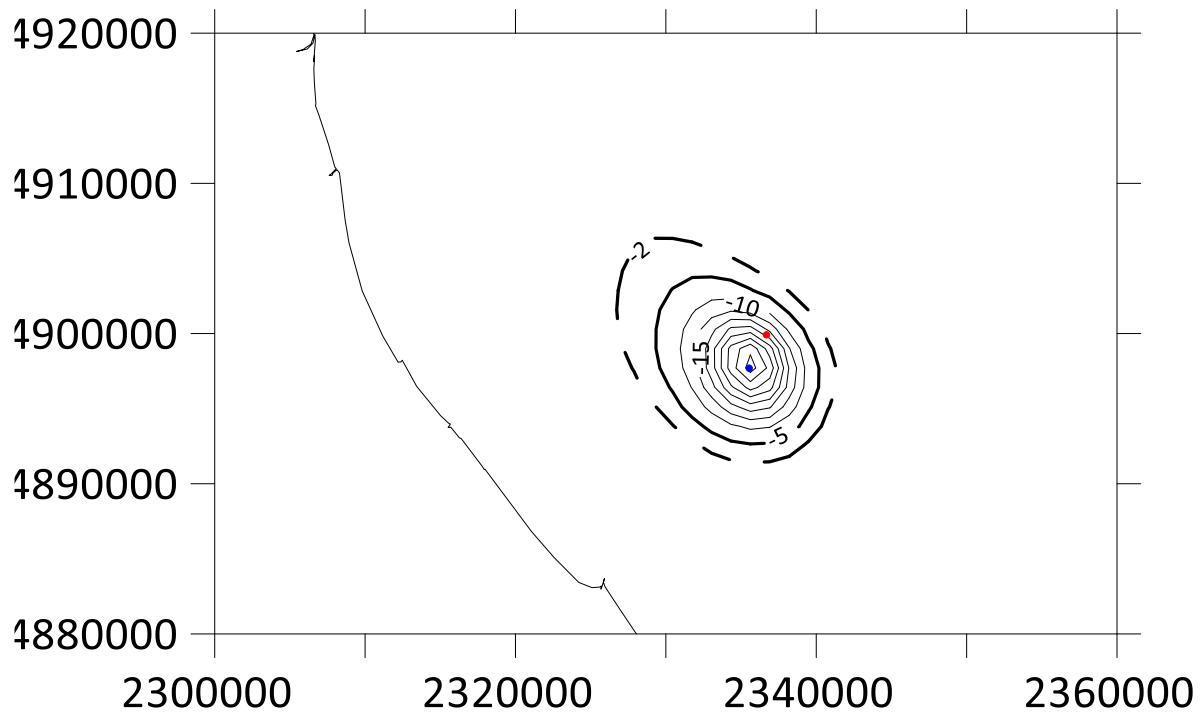


Figura 7 – Curve di iso-subsidenza a fine simulazione (gennaio 2051). In blu è riportata la posizione del punto di massimo, in rosso la posizione della piattaforma Anemone B.

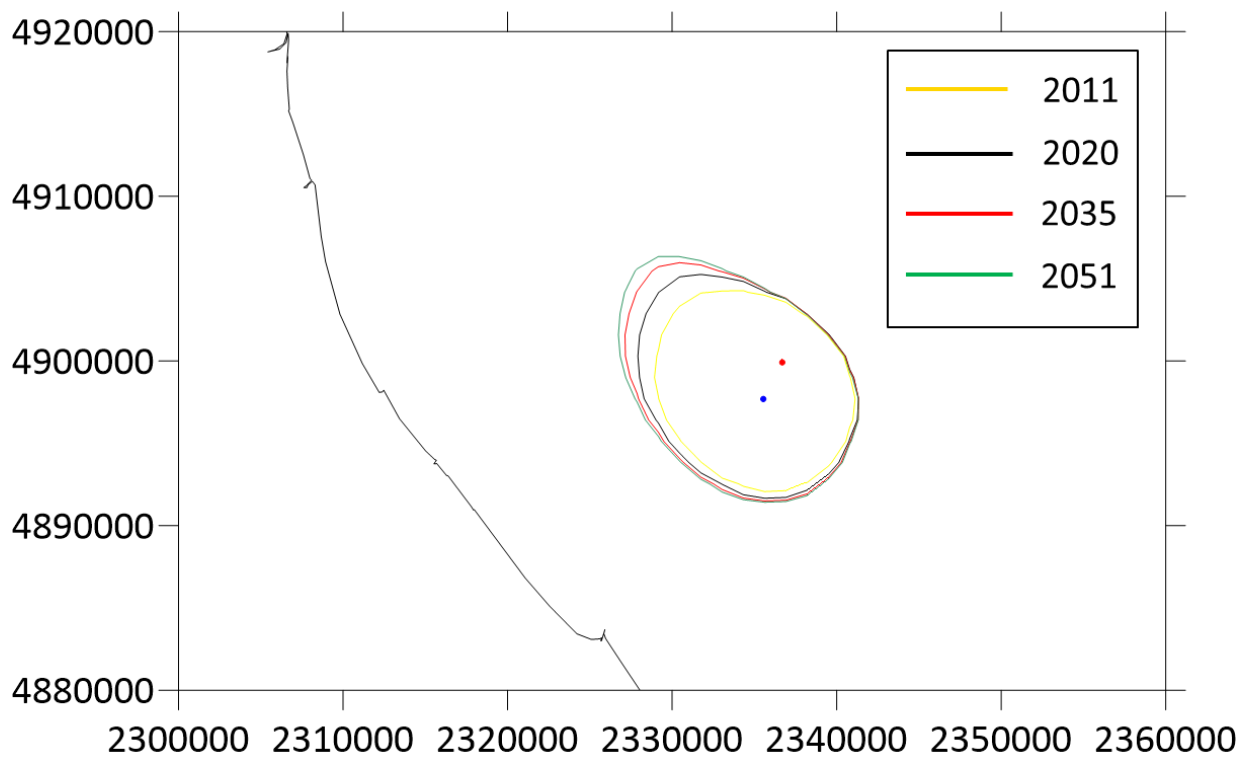


Figura 8 – Evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm. In blu è riportata la posizione del punto di massimo, in rosso la posizione della piattaforma Anemone B.

5. Confronto con i dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS

I valori di subsidenza calcolati dal modello numerico sono stati confrontati con quelli misurati dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma di produzione Anemone B.

Il confronto tra i risultati ottenuti con il modello geomeccanico e la serie storica misurata con il CGPS è illustrato in Figura 9. Si può osservare come il modello numerico riproduca con accuratezza gli spostamenti registrati dalla stazione CGPS.

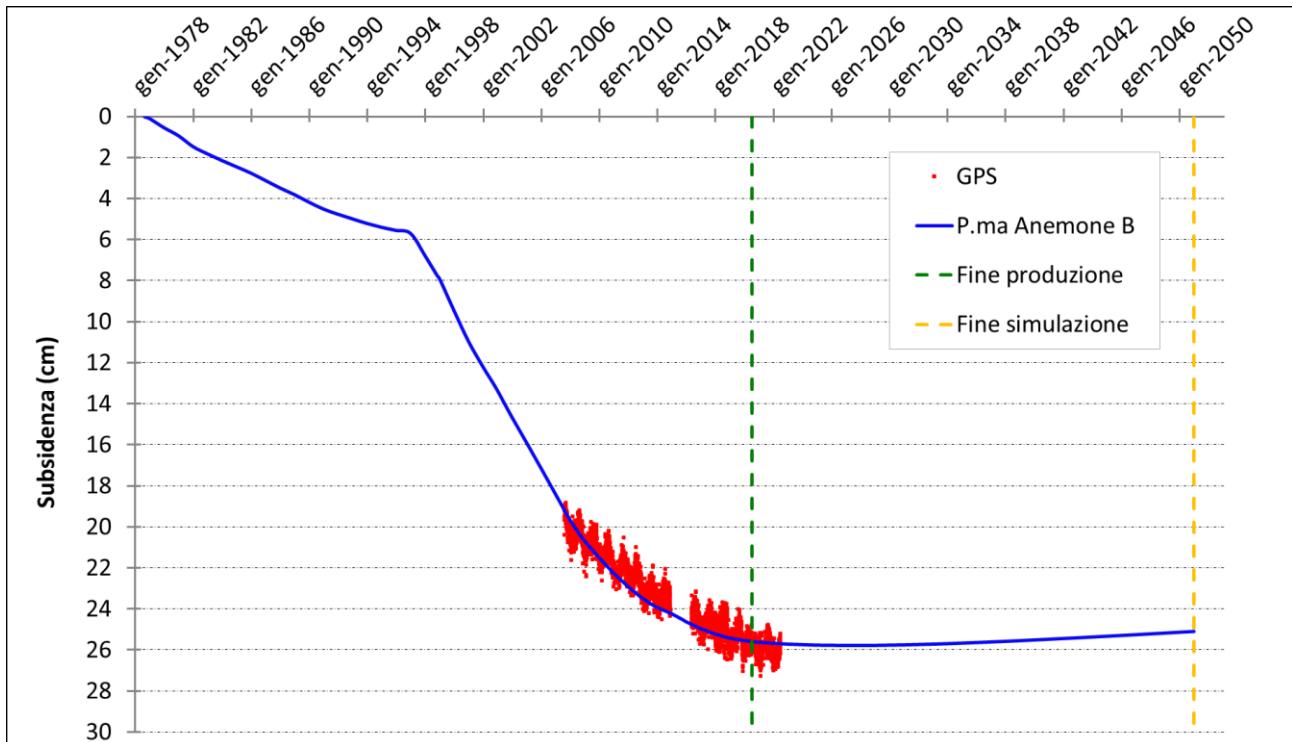


Figura 9 – Spostamento verticale della piattaforma Anemone B: risultati simulazione FE vs. dati CGPS.



Bibliografia

1. Ministero dello Sviluppo Economico, Direzione Generale per le Risorse Minerarie ed Energetiche (DGRME): *Elenco delle piattaforme marine e strutture assimilabili* (Dati al 31/12/2012, aggiornamento del 31/08/2013).
2. Abaqus™, Simulia, versione 3DEXPERIENCE R2019x HotFix 1.
3. Eclipse™, Schlumberger, versione 2019.3.
4. Campo di Anemone – Aggiornamento studio di giacimento per studio geomeccanico – Scheda riassuntiva – IPET-9DEA0C04-0. Gennaio 2022.
5. P.A. Vermeer and H.P. Neher: *A soft soil model that accounts for creep*. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam, 1999.
6. K. Roscoe and J. B. Burland: *On the generalized stress-strain behaviour of wet clay*. Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, 535-609, 1968
7. G. Volonté, F. Gemelli, S.K. Nguyen, G. Musso, R. Lancellotta, M. Brignoli and S. Mantica: *Advances in geomechanical subsidence modeling: effects of elasto-visco-plastic constitutive behavior*. ARMA 17-1043. 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, June 2017.
8. Italy - Anemone 3dir well – Geomechanical analyses – LAIP 16/2019/GM. October 2019.
9. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino. *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala*. Relazione Agip S.p.A, LAPO-12/96. Aprile 1996.