



# Campo di Anemone

## Modello Elasto-Plastico di Subsidenza

### Management Summary

#### LISTA DI DISTRIBUZIONE:

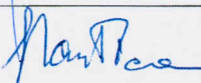
GEOES/CS

GEOD/CS

#### AUTORI

F. Gemelli	TENC
G. Volonté	
F. Bottazzi	

Data: 21 dicembre 2015

0	Rapporto Finale	M. C. Dacome 	D. Casini Ropa 
		S. Mantica 	M. Rotondi 
AGGIORNAMENTI	CONTROLLATO DA	APPROVATO DA	

## Indice

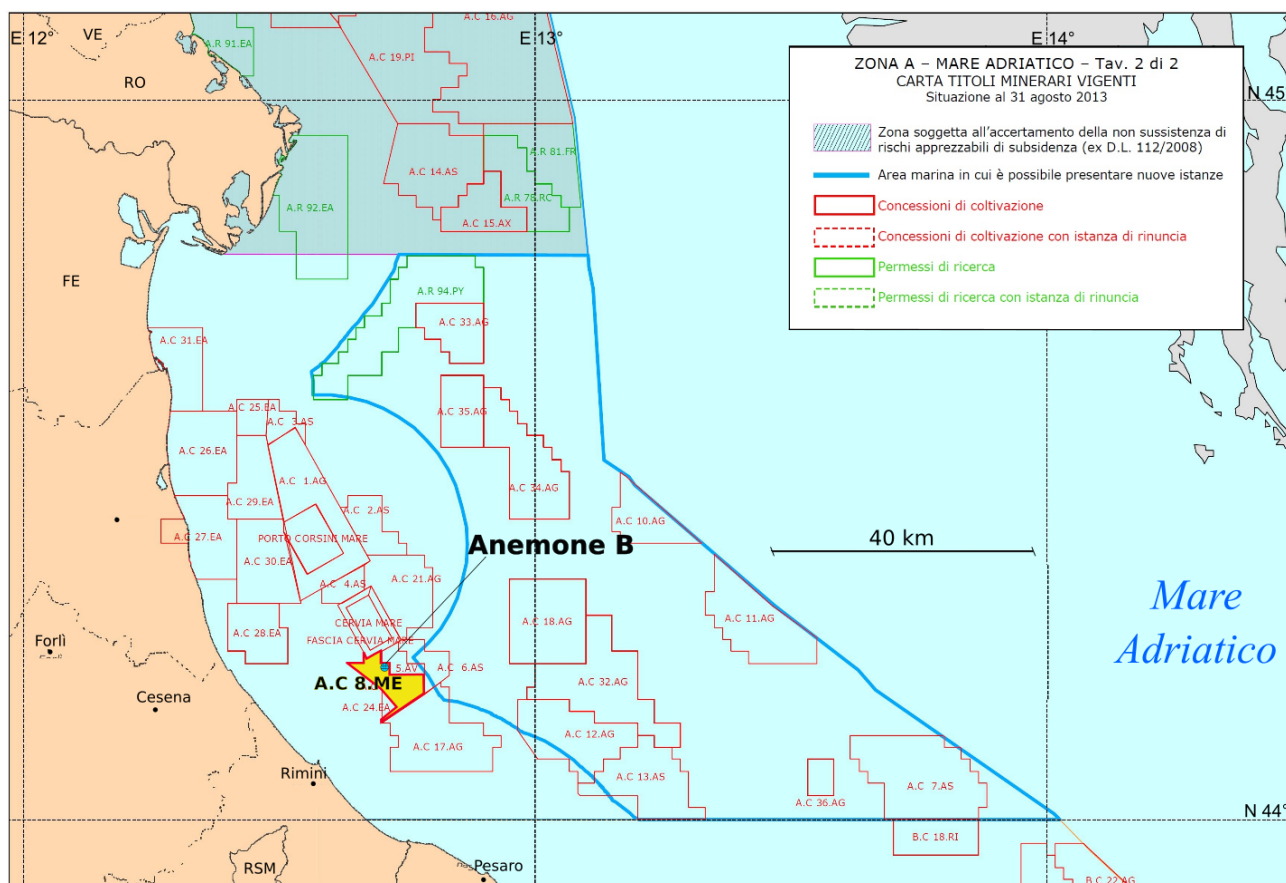
1	Introduzione .....	3
2	Modello Geomeccanico agli elementi finiti.....	4
2.1	Approccio metodologico.....	4
2.2	Geometria del modello.....	4
2.3	Proprietà dei materiali .....	6
2.3.1	Densità della roccia .....	6
2.3.2	Peso specifico dei fluidi saturanti .....	6
2.3.3	Compressibilità uniassiale.....	7
2.4	Inizializzazione e storia di pressione .....	14
2.4.1	Stato tensionale iniziale .....	14
2.4.2	Storia di pressione .....	14
3	Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico.....	15
4	Confronto con i dati delle stazioni CGPS .....	17
	Bibliografia .....	18

# 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. Il campo in oggetto si trova nel bacino settentrionale del mare Adriatico e ricade nella concessione di coltivazione A.C 8.ME (Figura 1). Eni è titolare del campo all'81% ed Edison per il restante 19% [1].

La piattaforma 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.

La produzione è stata avviata nel settembre 1978. Invece, la data di fine produzione prevista dal modello fluido-dinamico è luglio 2018.



**Figura 1 – Ubicazione della concessione di coltivazione A.C 8.ME e della piattaforma Anemone B. La presente mappa è un’elaborazione dell’originale pubblicata dal Ministero dello Sviluppo Economico [1].**

La valutazione della subsidenza per il campo in esame è stata effettuata con un modello geomeccanico 3D ad elementi finiti (FE) costruito utilizzando il codice di calcolo Abaqus [2]; in tale modello le informazioni relative alla geometria del giacimento, le proprietà petrofisiche e l’evoluzione della pressione sono state ottenute dallo studio fluido-dinamico di giacimento realizzato con il codice di calcolo alle differenze finite (FD) Eclipse [3].



## 2 Modello Geomeccanico agli elementi finiti

### 2.1 Approccio metodologico

Lo studio geomeccanico di subsidenza è stato condotto utilizzando il codice agli elementi finiti Abaqus. La costruzione del modello è stata basata sulle seguenti informazioni:

- mappe geologiche dei livelli interessati dal giacimento, estese in misura tale da descrivere interamente le zone mineralizzate ed anche gli acquiferi laterali idraulicamente connessi agli strati produttivi;
- descrizione dettagliata di geometria e geologia dei livelli mineralizzati e degli acquiferi ad essi connessi idraulicamente, riprodotti con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica;
- distribuzione di pressione nei livelli mineralizzati e negli acquiferi connessi, calcolata con un modello di flusso 3D Eclipse [4]. Tale modello prevede che a fine produzione (01/07/2018) saranno stati estratti  $4.570 \times 10^9$  Sm<sup>3</sup> di gas. Lo studio fluido-dinamico di giacimento è stato comunque protratto fino alla data 01/01/2048 (a pozzi chiusi), in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione;
- descrizione della risposta meccanica della roccia con una legge costitutiva del tipo Cam Clay Modificato, che tiene conto non solo della variazione della compressibilità uniassiale ( $c_m$ ) con la tensione efficace, ma modella accuratamente anche gli eventuali fenomeni di espansione dei sedimenti soggetti a ripressurizzazione;
- calcolo della compattazione dei livelli mineralizzati e degli acquiferi connessi basato sullo spessore *gross* degli stessi e sulla più aggiornata stima della compressibilità uniassiale, ottenuta da misure di compattazione in situ effettuate nel pozzo Anemone 6dir equipaggiato con markers e dalla successiva calibrazione del modello sulla base delle misure CGPS.

### 2.2 Geometria del modello

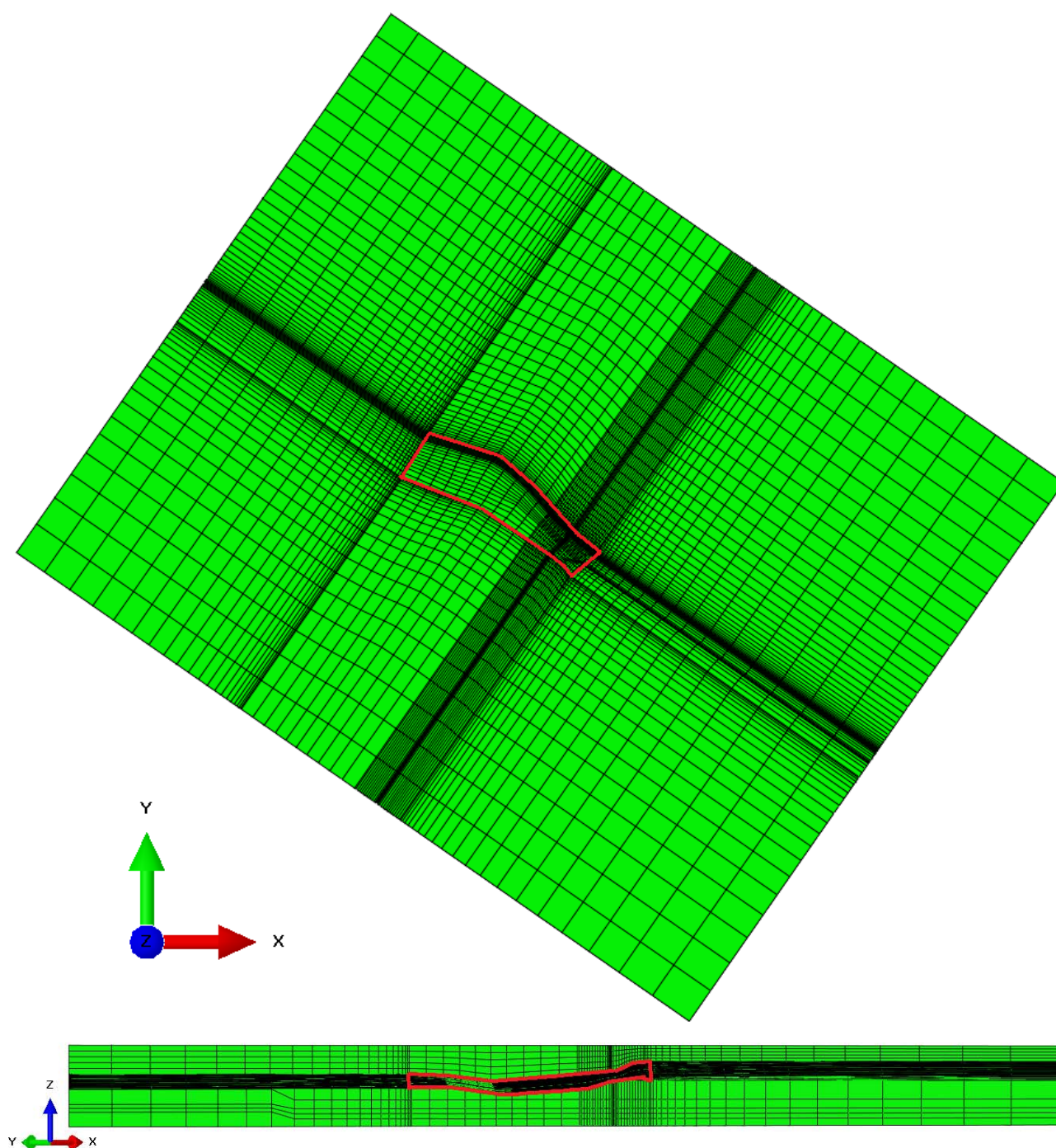
Il modello agli elementi finiti è stato costruito a partire dal modello fluido-dinamico alle differenze finite del sistema giacimento-acquifero. Come ampiamente descritto in [4], la griglia di quest'ultimo è composta da 104x32x209 celle nelle direzioni X, Y e Z, rispettivamente, per un totale di 695552 celle, di cui 289536 inattive.

Al fine di limitare il numero di gradi di libertà del modello agli elementi finiti, è stato effettuato un processo di *upscaling* orizzontale, cioè, un accorpamento di celle adiacenti e 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 lungo X e 18 lungo Y.

Al fine di rendere trascurabili gli effetti dei vincoli cinematici che verranno imposti al contorno del modello agli elementi finiti, la griglia alle differenze finite (25 km di lunghezza e 7 km di larghezza) è stata estesa lateralmente fino a diventare un'area rettangolare di lati 100 km e 80 km. Tale estensione è stata realizzata con l'aggiunta, ad ognuno dei 209 livelli, di 40 elementi lungo X e 52 elementi lungo Y. L'insieme di tali elementi compone il *side-burden*. Per la stessa motivazione la griglia è stata estesa verso il basso con l'aggiunta di 5 livelli di *under-burden*, fino al raggiungimento della profondità di 8000 mssl.

Infine, dato l'obiettivo del presente studio, è necessario che il modello raggiunga il fondale marino e, quindi, sono stati aggiunti 5 livelli di *over-burden*.

Il modello complessivo risulta perciò composto da 79x70x219 elementi nelle direzioni X, Y e Z, rispettivamente, per un totale di 1211070 elementi, 1249600 nodi e 3886664 gradi di libertà. Esso si estende verticalmente da 22 a 8000 mssl, ed in pianta copre un'area rettangolare di 100x80 km<sup>2</sup> (Figura 2).



**Figura 2 – Estensione del modello geomeccanico (il riquadro rosso indica l'estensione del modello fluido-dinamico).**

## 2.3 Proprietà dei materiali

### 2.3.1 Densità della roccia

Per mezzo dei *density log* registrati in tre pozzi (Anemone 3 Dir A, Anemone 9 Dir, Benedetta 1) e del *sonic log* nel pozzo Anemone 1 è stato possibile ricavare il seguente profilo di densità  $\rho$  del mezzo poroso:

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

in cui la profondità  $z$  è misurata in metri TVDSS (*True Vertical Depth Sub Sea*) e  $\rho$  in  $\text{kg/m}^3$ , mentre la profondità del fondale marino  $z_{fm}$  è pari a 22 m (Figura 3). Per la densità dell'acqua marina è stato assunto il valore di  $1030.0 \text{ kg/m}^3$ .

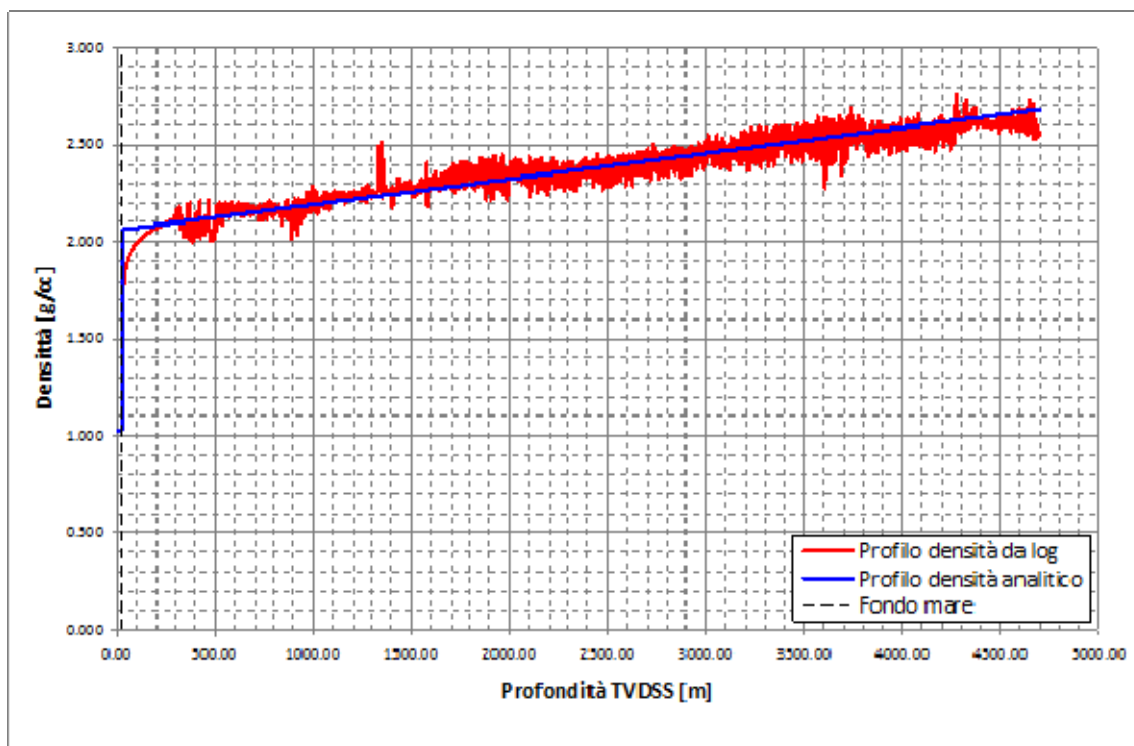


Figura 3 – Profilo di densità da log e analitico.

### 2.3.2 Peso specifico dei fluidi saturanti

Viene fornito al modello FE il valore del peso specifico dei fluidi saturanti. Per ogni regione idromeccanica il valore di  $\gamma_f$  (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.

### 2.3.3 Compressibilità uniassiale

La compressibilità uniassiale  $c_m$  del materiale è il parametro geomeccanico chiave nelle analisi dei fenomeni di subsidenza.

Come descritto in [5], i valori più attendibili di  $c_m$  sono ottenuti dall'interpretazione di misure di compattazione registrate *in situ* tramite markers e sono, generalmente, funzione non lineare della tensione verticale efficace  $\sigma'_v$ . Ciò è particolarmente vero per sedimenti profondi, come quelli che caratterizzano il campo di Anemone.

Nel presente studio, in seguito ad una dettagliata analisi della qualità dei dati di compattazione registrati lungo il pozzo Anemone 6 Dir, è stato applicato l'approccio proposto da Hueckel et al. [6] per derivare dei valori di  $c_m$ . La regressione di questi ultimi ha fornito la seguente relazione non lineare tra  $c_m$  e  $\sigma'_v$ , espresse rispettivamente in  $\text{bar}^{-1}$  e bar:

$$c_m = 0.01367 \cdot \sigma_v'^{-1.26740} \quad (2)$$

In Figura 4 viene mostrata tale relazione ed il relativo intervallo di confidenza. L'ampiezza di quest'ultimo è leggermente inferiore a quella della regressione di Hueckel et al. [6], il cui valore medio è riportato per confronto in Figura 4.

Inoltre, al fine di utilizzare tutti i dati disponibili per la costruzione del presente modello geomeccanico e data la disponibilità di dati di spostamento registrati dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma Anemone B, si è ulteriormente arricchita la caratterizzazione meccanica della sequenza sedimentaria del campo in oggetto con la definizione della seguente legge di compressibilità in grado di garantire la corretta riproduzione delle misure di subsidenza da parte del modello. Tale legge si differenzia dalla precedente per il fattore moltiplicativo 1.21:

$$c_m = 1.21 \cdot 0.01367 \cdot \sigma_v'^{-1.26740} \quad (3)$$

E' importante notare che la relazione (2) ricade all'interno della banda di confidenza della legge (2) (Figura 4).

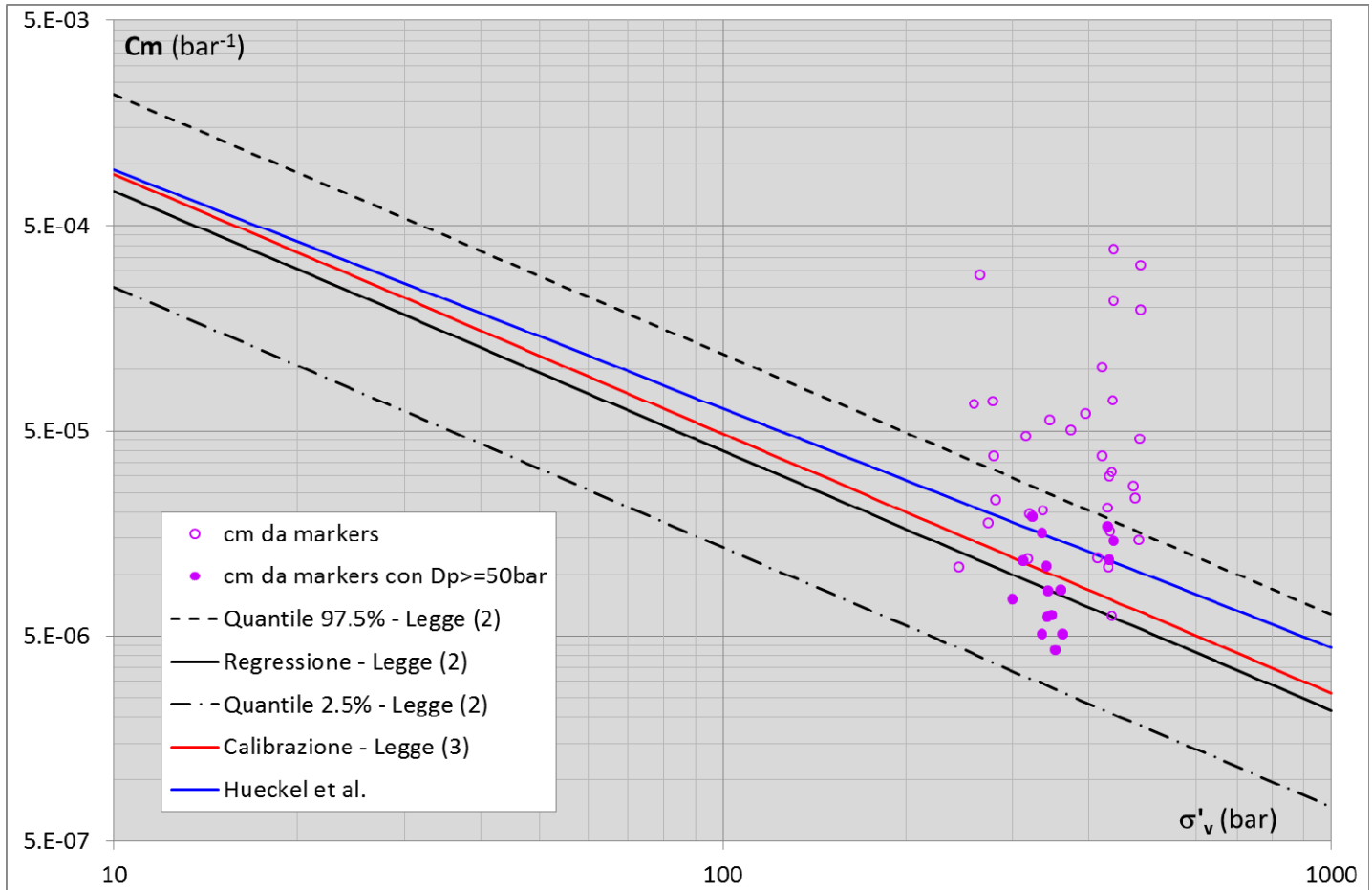
Si precisa che, nelle relazioni (2) e (3)  $\sigma'_v$  è stata calcolata secondo la seguente definizione come differenza tra la tensione verticale totale  $\sigma_v$  e la pressione dei pori  $p$ :

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad (4)$$

con  $\sigma_v$  calcolata a partire dalla densità del materiale e  $p$  fornita dal modello fluido-dinamico. In quest'ultimo sono state, ovviamente, utilizzate comprimibilità dei pori coerenti con quelle assegnate nel presente modello geomeccanico.

Per la caratterizzazione meccanica delle formazioni carbonatiche e marnoso-gessose presenti nell'under-burden, si è fatto riferimento alle informazioni disponibili per degli analoghi e si sono assegnati i seguenti valori di  $c_m$  e coefficiente di Poisson:  $2.77\text{E-}06 \text{ bar}^{-1}$  e 0.35 per i carbonati,  $4.80\text{E-}06 \text{ bar}^{-1}$  e 0.25 per marne e gessi.

Nella Tabella 1 sono riportati, per ognuno dei 219 livelli, i valori di profondità media,  $\sigma_v$ ,  $p$ ,  $\sigma'_v$ ,  $c_m$ ,  $\nu$ , modulo di Young  $E$ , pendenza della retta di normal-compressione  $\lambda$  e di scarico-ricarico  $\kappa$  nel piano  $e:\ln p'$  (dove  $e$  è l'indice dei vuoti e  $p'$  è la tensione media efficace).



**Figura 4 – Legge di compressibilità adottata per il campo di Anemone (in rosso) a seguito della calibrazione sulle misure CGPS, a confronto con quella ottenuta dall'interpretazione delle misure di compattazione *in situ* nello stesso campo (in nero) e con quella proposta in Hueckel et al. [6].**





**Tabella 1 – Proprietà dei materiali assegnate ad ogni layer.**

Layer	Profondità media	$\sigma_v$	$p$	$\sigma'_v$	$c_m$	$\nu$	$E$	$\lambda$	$\kappa$
	[m]	[bar]			[bar <sup>-1</sup> ]	[-]	[GPa]	[-]	[-]
Over-burden 1	509.0	99.27	49.97	49.30	1.14E-04	0.25	0.7	-	-
Over-burden 2	995.9	199.21	97.72	101.49	4.55E-05		1.8	-	-
Over-burden 3	1482.9	302.04	145.46	156.58	2.62E-05		3.2	-	-
Over-burden 4	1969.9	407.78	193.21	214.57	1.76E-05		4.7	-	-
Over-burden 5	2456.9	516.42	240.95	275.47	1.28E-05		6.5	-	-
Reservoir 1	2943.8	648.73	320.33	328.40	9.320E-06	0.25	7.8	4.595E-03	1.532E-03
Reservoir 2	2952.8	627.96	316.81	311.16	9.980E-06		8.0	-	-
Reservoir 3	2952.8	627.96	316.81	311.16	9.980E-06		8.0	-	-
Reservoir 4	2961.7	653.02	325.49	327.53	9.350E-06		7.8	4.603E-03	1.534E-03
Reservoir 5	2967.5	654.40	326.09	328.31	9.320E-06		7.8	4.570E-03	1.523E-03
Reservoir 6	2975.7	656.38	326.86	329.52	9.280E-06		7.8	4.601E-03	1.534E-03
Reservoir 7	2989.1	659.61	326.22	333.39	9.150E-06		7.9	-	-
Reservoir 8	2989.1	659.61	326.22	333.39	9.150E-06		7.9	4.570E-03	1.523E-03
Reservoir 9	2995.1	661.06	326.59	334.47	9.110E-06		8.0	-	-
Reservoir 10	3001.1	662.51	326.97	335.54	9.070E-06		8.0	4.586E-03	1.529E-03
Reservoir 11	3008.6	664.32	326.92	337.39	9.010E-06		8.1	-	-
Reservoir 12	3016.2	666.13	326.88	339.25	8.950E-06		8.1	4.554E-03	1.518E-03
Reservoir 13	3025.1	668.28	326.75	341.53	8.870E-06		8.2	-	-
Reservoir 14	3025.1	668.28	326.75	341.53	8.870E-06		8.2	4.570E-03	1.523E-03
Reservoir 15	3035.4	670.78	327.13	343.65	8.800E-06		8.3	-	-
Reservoir 16	3045.8	673.28	327.50	345.78	8.740E-06		8.3	4.508E-03	1.503E-03
Reservoir 17	3048.7	673.98	327.64	346.34	8.720E-06		8.3	-	-
Reservoir 18	3051.6	674.68	327.78	346.90	8.700E-06		8.4	4.521E-03	1.507E-03
Reservoir 19	3060.6	676.87	331.03	345.84	8.730E-06		8.3	-	-
Reservoir 20	3069.7	679.06	334.28	344.78	8.770E-06		8.3	4.523E-03	1.508E-03
Reservoir 21	3069.7	679.06	334.28	344.78	8.770E-06		8.3	-	-
Reservoir 22	3069.7	679.06	334.28	344.78	8.770E-06		8.3	4.523E-03	1.508E-03
Reservoir 23	3069.7	679.06	334.28	344.78	8.770E-06		8.3	4.523E-03	1.508E-03
Reservoir 24	3073.7	680.04	333.90	346.14	8.720E-06		8.3	4.489E-03	1.496E-03
Reservoir 25	3076.2	680.65	334.05	346.59	8.710E-06		8.3	-	-
Reservoir 26	3078.8	681.25	334.20	347.05	8.690E-06		8.4	4.532E-03	1.511E-03
Reservoir 27	3083.2	682.32	333.20	349.12	8.630E-06		8.4	-	-
Reservoir 28	3087.6	683.38	332.19	351.20	8.570E-06		8.5	4.549E-03	1.516E-03
Reservoir 29	3087.6	683.38	332.19	351.20	8.570E-06		8.5	-	-
Reservoir 30	3094.0	684.95	334.39	350.56	8.590E-06		8.5	4.538E-03	1.513E-03
Reservoir 31	3096.9	685.64	333.94	351.70	8.550E-06		8.5	-	-
Reservoir 32	3099.7	686.32	333.48	352.84	8.520E-06		8.5	4.525E-03	1.508E-03
Reservoir 33	3109.7	688.74	339.25	349.49	8.620E-06		8.4	-	-
Reservoir 34	3119.6	691.16	345.02	346.14	8.720E-06		8.3	4.500E-03	1.500E-03
Reservoir 35	3119.6	691.16	345.02	346.14	8.720E-06		8.3	4.500E-03	1.500E-03
Reservoir 36	3127.8	693.15	345.19	347.95	8.670E-06		8.4	-	-
Reservoir 37	3136.0	695.14	345.36	349.77	8.610E-06		8.4	4.514E-03	1.505E-03
Reservoir 38	3136.0	695.14	345.36	349.77	8.610E-06		8.4	4.514E-03	1.505E-03
Reservoir 39	3145.1	697.33	345.44	351.89	8.540E-06		8.5	4.480E-03	1.493E-03
Reservoir 40	3160.5	701.07	345.62	355.45	8.440E-06		8.6	-	-



Layer	Profondità media	$\sigma_v$	$p$	$\sigma'_v$	$c_m$	$\nu$	$E$	$\lambda$	$\kappa$
	[m]	[bar]	[bar <sup>-1</sup> ]	[-]	[bar <sup>-1</sup> ]	[-]	[GPa]	[-]	[-]
Reservoir 41	3175.9	704.81	345.79	359.02	8.330E-06	0.25	8.7	4.439E-03	1.480E-03
Reservoir 42	3187.1	707.54	346.37	361.17	8.270E-06		8.8	-	-
Reservoir 43	3198.3	710.27	346.95	363.33	8.210E-06		8.9	4.407E-03	1.469E-03
Reservoir 44	3202.8	711.37	347.04	364.33	8.180E-06		8.9	-	-
Reservoir 45	3207.3	712.46	347.13	365.33	8.150E-06		8.9	4.429E-03	1.476E-03
Reservoir 46	3213.5	713.98	347.56	366.42	8.120E-06		9.0	-	-
Reservoir 47	3219.7	715.50	347.99	367.50	8.090E-06		9.0	4.416E-03	1.472E-03
Reservoir 48	3233.3	718.80	348.56	370.24	8.020E-06		9.1	4.368E-03	1.456E-03
Reservoir 49	3233.3	718.80	348.56	370.24	8.020E-06		9.1	-	-
Reservoir 50	3251.4	723.22	355.93	367.29	8.100E-06		9.0	4.417E-03	1.472E-03
Reservoir 51	3251.4	723.22	355.93	367.29	8.100E-06		9.0	-	-
Reservoir 52	3261.2	725.61	357.02	368.59	8.060E-06		9.0	4.441E-03	1.480E-03
Reservoir 53	3265.1	726.57	357.11	369.46	8.040E-06		9.0	-	-
Reservoir 54	3269.0	727.53	357.20	370.33	8.010E-06		9.1	4.419E-03	1.473E-03
Reservoir 55	3275.4	729.09	357.50	371.59	7.980E-06		9.1	-	-
Reservoir 56	3281.8	730.65	357.80	372.85	7.940E-06		9.2	4.388E-03	1.463E-03
Reservoir 57	3292.8	733.34	357.74	375.59	7.870E-06		9.2	-	-
Reservoir 58	3303.7	736.02	357.69	378.33	7.800E-06		9.3	4.390E-03	1.463E-03
Reservoir 59	3303.7	736.02	357.69	378.33	7.800E-06		9.3	4.390E-03	1.463E-03
Reservoir 60	3318.2	739.57	359.69	379.87	7.760E-06		9.4	4.354E-03	1.451E-03
Reservoir 61	3330.4	742.55	364.58	377.97	7.810E-06		9.3	-	-
Reservoir 62	3342.5	745.53	369.46	376.07	7.860E-06		9.3	4.342E-03	1.447E-03
Reservoir 63	3342.5	745.53	369.46	376.07	7.860E-06		9.3	-	-
Reservoir 64	3342.5	745.53	369.46	376.07	7.860E-06		9.3	4.342E-03	1.447E-03
Reservoir 65	3355.9	748.82	371.59	377.23	7.830E-06		9.3	-	-
Reservoir 66	3369.3	752.10	373.71	378.39	7.800E-06		9.3	4.347E-03	1.449E-03
Reservoir 67	3383.4	755.58	373.79	381.79	7.710E-06		9.4	-	-
Reservoir 68	3397.6	759.06	373.87	385.20	7.630E-06		9.5	4.315E-03	1.438E-03
Reservoir 69	3397.6	759.06	373.87	385.20	7.630E-06		9.5	4.315E-03	1.438E-03
Reservoir 70	3404.1	760.68	375.16	385.52	7.620E-06		9.5	-	-
Reservoir 71	3410.7	762.30	376.46	385.84	7.610E-06		9.6	4.363E-03	1.454E-03
Reservoir 72	3418.8	764.29	376.39	387.90	7.560E-06		9.6	4.301E-03	1.434E-03
Reservoir 73	3444.0	770.49	381.29	389.20	7.530E-06		9.7	-	-
Reservoir 74	3444.0	770.49	381.29	389.20	7.530E-06		9.7	4.281E-03	1.427E-03
Reservoir 75	3444.0	770.49	381.29	389.20	7.530E-06		9.7	4.281E-03	1.427E-03
Reservoir 76	3455.1	773.24	381.63	391.60	7.470E-06		9.7	-	-
Reservoir 77	3466.2	775.98	381.98	394.00	7.410E-06		9.8	4.305E-03	1.435E-03
Reservoir 78	3468.9	776.65	383.35	393.30	7.430E-06		9.8	-	-
Reservoir 79	3471.6	777.32	384.72	392.60	7.450E-06		9.8	4.298E-03	1.433E-03
Reservoir 80	3475.2	778.21	384.81	393.39	7.430E-06		9.8	-	-
Reservoir 81	3478.8	779.09	384.91	394.19	7.410E-06		9.8	4.304E-03	1.435E-03
Reservoir 82	3491.5	782.23	387.48	394.75	7.390E-06		9.8	-	-
Reservoir 83	3504.1	785.37	390.06	395.31	7.380E-06		9.9	4.256E-03	1.419E-03
Reservoir 84	3504.1	785.37	390.06	395.31	7.380E-06		9.9	4.256E-03	1.419E-03
Reservoir 85	3504.1	785.37	390.06	395.31	7.380E-06		9.9	4.256E-03	1.419E-03
Reservoir 86	3525.5	790.67	391.66	399.00	7.300E-06		10.0	-	-
Reservoir 87	3546.9	795.97	393.27	402.70	7.210E-06		10.1	4.231E-03	1.410E-03



Layer	Profondità media	$\sigma_v$	$p$	$\sigma'_v$	$c_m$	$\nu$	$E$	$\lambda$	$\kappa$
	[m]	[bar]	[bar <sup>-1</sup> ]	[-]	[bar <sup>-1</sup> ]	[-]	[GPa]	[-]	[-]
Reservoir 88	3546.9	795.97	393.27	402.70	7.210E-06	0.25	10.1	4.231E-03	1.410E-03
Reservoir 89	3546.9	795.97	393.27	402.70	7.210E-06		10.1	-	-
Reservoir 90	3546.9	795.97	393.27	402.70	7.210E-06		10.1	4.231E-03	1.410E-03
Reservoir 91	3546.9	795.97	393.27	402.70	7.210E-06		10.1	-	-
Reservoir 92	3546.9	795.97	393.27	402.70	7.210E-06		10.1	4.231E-03	1.410E-03
Reservoir 93	3546.9	795.97	393.27	402.70	7.210E-06		10.1	-	-
Reservoir 94	3546.9	795.97	393.27	402.70	7.210E-06		10.1	4.231E-03	1.410E-03
Reservoir 95	3570.3	801.77	397.45	404.33	7.170E-06		10.1	-	-
Reservoir 96	3593.7	807.58	401.62	405.96	7.140E-06		10.2	4.202E-03	1.401E-03
Reservoir 97	3593.7	807.58	401.62	405.96	7.140E-06		10.2	4.202E-03	1.401E-03
Reservoir 98	3610.9	811.88	402.58	409.30	7.070E-06		10.3	4.190E-03	1.397E-03
Reservoir 99	3622.4	814.74	405.16	409.58	7.060E-06		10.3	-	-
Reservoir 100	3633.9	817.60	407.74	409.87	7.050E-06		10.3	4.199E-03	1.400E-03
Reservoir 101	3642.6	819.77	409.84	409.93	7.050E-06		10.3	-	-
Reservoir 102	3651.3	821.93	411.94	410.00	7.050E-06		10.3	3.992E-03	1.331E-03
Reservoir 103	3659.9	824.08	413.19	410.89	7.030E-06		10.3	-	-
Reservoir 104	3668.5	826.23	414.44	411.79	7.010E-06		10.4	3.983E-03	1.328E-03
Reservoir 105	3681.8	829.55	419.93	409.62	7.060E-06		10.3	-	-
Reservoir 106	3695.1	832.87	425.43	407.45	7.110E-06		10.2	3.983E-03	1.328E-03
Reservoir 107	3707.5	835.97	426.03	409.93	7.050E-06		10.3	-	-
Reservoir 108	3719.9	839.07	426.64	412.42	7.000E-06		10.4	3.965E-03	1.322E-03
Reservoir 109	3729.2	841.41	425.92	415.49	6.930E-06		10.5	-	-
Reservoir 110	3738.6	843.75	425.19	418.56	6.870E-06		10.6	3.941E-03	1.314E-03
Reservoir 111	3753.2	847.41	428.31	419.10	6.860E-06		10.6	-	-
Reservoir 112	3767.8	851.07	431.43	419.64	6.850E-06		10.6	3.928E-03	1.309E-03
Reservoir 113	3767.8	851.07	431.43	419.64	6.850E-06		10.6	-	-
Reservoir 114	3767.8	851.07	431.43	419.64	6.850E-06		10.6	3.928E-03	1.309E-03
Reservoir 115	3767.8	851.07	431.43	419.64	6.850E-06		10.6	-	-
Reservoir 116	3767.8	851.07	431.43	419.64	6.850E-06		10.6	3.928E-03	1.309E-03
Reservoir 117	3767.8	851.07	431.43	419.64	6.850E-06		10.6	3.928E-03	1.309E-03
Reservoir 118	3780.2	854.18	433.13	421.06	6.820E-06		10.7	-	-
Reservoir 119	3792.5	857.29	434.82	422.47	6.790E-06		10.7	3.912E-03	1.304E-03
Reservoir 120	3802.3	859.75	436.67	423.08	6.780E-06		10.7	-	-
Reservoir 121	3812.1	862.22	438.52	423.69	6.760E-06		10.8	3.904E-03	1.301E-03
Reservoir 122	3845.6	870.65	439.66	430.99	6.620E-06		11.0	-	1.292E-03
Reservoir 123	3845.6	870.65	439.66	430.99	6.620E-06		11.0	3.875E-03	1.292E-03
Reservoir 124	3845.6	870.65	439.66	430.99	6.620E-06		11.0	3.875E-03	1.292E-03
Reservoir 125	3867.8	876.24	448.75	427.49	6.690E-06		10.9	-	-
Reservoir 126	3890.0	881.83	457.83	424.00	6.760E-06		10.8	3.873E-03	1.291E-03
Reservoir 127	3890.0	881.83	457.83	424.00	6.760E-06		10.8	3.873E-03	1.291E-03
Reservoir 128	3890.0	881.83	457.83	424.00	6.760E-06		10.8	-	-
Reservoir 129	3890.0	881.83	457.83	424.00	6.760E-06		10.8	3.873E-03	1.291E-03
Reservoir 130	3890.0	881.83	457.83	424.00	6.760E-06		10.8	-	-
Reservoir 131	3890.0	881.83	457.83	424.00	6.760E-06		10.8	3.873E-03	1.291E-03
Reservoir 132	3908.7	886.56	458.76	427.80	6.680E-06		10.9	-	-
Reservoir 133	3927.4	891.29	459.69	431.61	6.610E-06		11.0	3.842E-03	1.281E-03
Reservoir 134	3927.4	891.29	459.69	431.61	6.610E-06	11.0	3.842E-03	1.281E-03	



Layer	Profondità media	$\sigma_v$	$p$	$\sigma'_v$	$c_m$	$\nu$	$E$	$\lambda$	$\kappa$
	[m]	[bar]	[bar <sup>-1</sup> ]	[-]	[bar <sup>-1</sup> ]		[GPa]	[-]	[-]
Reservoir 135	3927.4	891.29	459.69	431.61	6.610E-06	0.25	11.0	-	-
Reservoir 136	3944.9	895.73	460.43	435.30	6.540E-06		11.1	3.830E-03	1.277E-03
Reservoir 137	3952.5	897.64	462.89	434.75	6.550E-06		11.1	-	-
Reservoir 138	3960.0	899.56	465.36	434.20	6.560E-06		11.1	3.826E-03	1.275E-03
Reservoir 139	3960.0	899.56	465.36	434.20	6.560E-06		11.1	3.826E-03	1.275E-03
Reservoir 140	3976.0	903.62	467.70	435.91	6.530E-06		11.2	-	-
Reservoir 141	3992.1	907.68	470.05	437.63	6.490E-06		11.2	3.808E-03	1.269E-03
Reservoir 142	3992.1	907.68	470.05	437.63	6.490E-06		11.2	3.808E-03	1.269E-03
Reservoir 143	3992.1	907.68	470.05	437.63	6.490E-06		11.2	3.808E-03	1.269E-03
Reservoir 144	3992.1	907.68	470.05	437.63	6.490E-06		11.2	-	-
Reservoir 145	4031.2	917.64	479.02	438.61	6.480E-06		11.2	3.791E-03	1.264E-03
Reservoir 146	4031.2	917.64	479.02	438.61	6.480E-06		11.2	-	-
Reservoir 147	4031.2	917.64	479.02	438.61	6.480E-06		11.2	3.791E-03	1.264E-03
Reservoir 148	4031.2	917.64	479.02	438.61	6.480E-06		11.2	3.791E-03	1.264E-03
Reservoir 149	4031.2	917.64	479.02	438.61	6.480E-06		11.2	-	-
Reservoir 150	4031.2	917.64	479.02	438.61	6.480E-06		11.2	3.791E-03	1.264E-03
Reservoir 151	4053.9	923.40	481.68	441.72	6.420E-06		11.3	3.776E-03	1.259E-03
Reservoir 152	4053.9	923.40	481.68	441.72	6.420E-06		11.3	-	-
Reservoir 153	4076.7	929.22	481.60	447.62	6.310E-06		11.5	3.756E-03	1.252E-03
Reservoir 154	4076.7	929.22	481.60	447.62	6.310E-06		11.5	-	-
Reservoir 155	4076.7	929.22	481.60	447.62	6.310E-06		11.5	3.756E-03	1.252E-03
Reservoir 156	4097.9	934.63	483.74	450.89	6.260E-06		11.6	3.743E-03	1.248E-03
Reservoir 157	4097.9	934.63	483.74	450.89	6.260E-06		11.6	-	-
Reservoir 158	4097.9	934.63	483.74	450.89	6.260E-06		11.6	3.743E-03	1.248E-03
Reservoir 159	4117.6	939.65	488.47	451.19	6.250E-06		11.7	-	-
Reservoir 160	4117.6	939.65	488.47	451.19	6.250E-06		11.7	3.737E-03	1.246E-03
Reservoir 161	4145.4	946.76	513.87	432.89	6.580E-06		11.1	3.769E-03	1.256E-03
Reservoir 162	4145.4	946.76	513.87	432.89	6.580E-06		11.1	-	-
Reservoir 163	4145.4	946.76	513.87	432.89	6.580E-06		11.1	3.769E-03	1.256E-03
Reservoir 164	4145.4	946.76	513.87	432.89	6.580E-06		11.1	-	-
Reservoir 165	4145.4	946.76	513.87	432.89	6.580E-06		11.1	3.769E-03	1.256E-03
Reservoir 166	4145.4	946.76	513.87	432.89	6.580E-06		11.1	3.769E-03	1.256E-03
Reservoir 167	4165.9	952.00	514.01	437.99	6.490E-06		11.2	-	-
Reservoir 168	4165.9	952.00	514.01	437.99	6.490E-06		11.2	3.749E-03	1.250E-03
Reservoir 169	4179.7	955.55	514.26	441.30	6.430E-06		11.3	-	-
Reservoir 170	4179.7	955.55	514.26	441.30	6.430E-06		11.3	3.738E-03	1.246E-03
Reservoir 171	4179.7	955.55	514.26	441.30	6.430E-06		11.3	3.738E-03	1.246E-03
Reservoir 172	4179.7	955.55	514.26	441.30	6.430E-06		11.3	3.738E-03	1.246E-03
Reservoir 173	4209.9	963.29	517.49	445.80	6.350E-06		11.5	-	-
Reservoir 174	4209.9	963.29	517.49	445.80	6.350E-06		11.5	3.718E-03	1.239E-03
Reservoir 175	4209.9	963.29	517.49	445.80	6.350E-06		11.5	3.718E-03	1.239E-03
Reservoir 176	4209.9	963.29	517.49	445.80	6.350E-06		11.5	-	-
Reservoir 177	4209.9	963.29	517.49	445.80	6.350E-06		11.5	3.718E-03	1.239E-03
Reservoir 178	4209.9	963.29	517.49	445.80	6.350E-06		11.5	3.718E-03	1.239E-03
Reservoir 179	4233.0	969.23	518.10	451.13	6.250E-06		11.7	-	-
Reservoir 180	4233.0	969.23	518.10	451.13	6.250E-06		11.7	3.698E-03	1.233E-03
Reservoir 181	4233.0	969.23	518.10	451.13	6.250E-06		11.7	-	-



Layer	Profondità media	$\sigma_v$	$p$	$\sigma'_v$	$c_m$	$\nu$	$E$	$\lambda$	$\kappa$
	[m]	[bar]	[bar <sup>-1</sup> ]	[-]	[bar <sup>-1</sup> ]	[-]	[GPa]	[-]	[-]
Reservoir 182	4247.7	973.00	527.11	445.89	6.340E-06	0.25	11.5	3.709E-03	1.236E-03
Reservoir 183	4247.7	973.00	527.11	445.89	6.340E-06		11.5	-	-
Reservoir 184	4263.4	977.04	526.57	450.46	6.260E-06		11.6	3.691E-03	1.230E-03
Reservoir 185	4263.4	977.04	526.57	450.46	6.260E-06		11.6	-	-
Reservoir 186	4273.0	979.51	526.98	452.53	6.230E-06		11.7	3.682E-03	1.227E-03
Reservoir 187	4289.6	983.77	528.88	454.90	6.190E-06		11.8	-	-
Reservoir 188	4289.6	983.77	528.88	454.90	6.190E-06		11.8	3.676E-03	1.225E-03
Reservoir 189	4289.6	983.77	528.88	454.90	6.190E-06		11.8	-	-
Reservoir 190	4303.0	987.23	529.88	457.35	6.140E-06		11.9	3.663E-03	1.221E-03
Reservoir 191	4303.0	987.23	529.88	457.35	6.140E-06		11.9	-	-
Reservoir 192	4333.4	995.08	531.42	463.66	6.040E-06		12.1	3.640E-03	1.213E-03
Reservoir 193	4333.4	995.08	531.42	463.66	6.040E-06		12.1	3.640E-03	1.213E-03
Reservoir 194	4333.4	995.08	531.42	463.66	6.040E-06		12.1	3.640E-03	1.213E-03
Reservoir 195	4347.0	998.61	531.78	466.83	5.990E-06		12.2	-	-
Reservoir 196	4360.7	1002.15	532.14	470.00	5.940E-06		12.3	3.619E-03	1.206E-03
Reservoir 197	4367.9	1004.00	535.92	468.09	5.970E-06		12.2	-	-
Reservoir 198	4375.1	1005.86	539.69	466.18	6.000E-06		12.1	3.623E-03	1.208E-03
Reservoir 199	4387.6	1009.09	539.62	469.47	5.950E-06		12.3	3.613E-03	1.204E-03
Reservoir 200	4394.2	1010.81	539.95	470.85	5.920E-06		12.3	-	-
Reservoir 201	4400.8	1012.52	540.28	472.24	5.900E-06		12.3	3.602E-03	1.201E-03
Reservoir 202	4404.2	1013.41	541.53	471.87	5.910E-06	12.3	-	-	
Reservoir 203	4407.6	1014.29	542.78	471.51	5.910E-06	12.3	3.604E-03	1.201E-03	
Reservoir 204	4415.4	1016.30	543.37	472.93	5.890E-06	12.4	-	-	
Reservoir 205	4423.1	1018.31	543.95	474.36	5.870E-06	12.4	3.590E-03	1.197E-03	
Reservoir 206	4423.1	1018.31	543.95	474.36	5.870E-06	12.4	-	-	
Reservoir 207	4440.1	1022.71	546.03	476.68	5.830E-06	12.5	3.585E-03	1.195E-03	
Reservoir 208	4450.1	1012.82	545.31	467.52	5.980E-06	12.6	-	-	
Reservoir 209	4450.1	1012.82	545.31	467.52	5.980E-06	12.6	-	-	
Under-burden 1	5001.6	1170.58	505.38	665.20	4.800E-06	0.25	17.4	-	-
Under-burden 2 (marne & gessi)	5601.3	1333.01	565.97	767.03	4.800E-06	0.25	17.4	-	-
Under-burden 2 (carbonati)		1333.01	565.97	767.03	2.770E-06	0.35	22.5	-	-
Under-burden 3 (marne & gessi)	6201.0	1500.10	626.57	873.54	4.800E-06	0.25	17.4	-	-
Under-burden 3 (carbonati)		1500.10	626.57	873.54	2.770E-06	0.35	22.5	-	-
Under-burden 4 (marne & gessi)	6800.7	1671.87	687.16	984.71	4.800E-06	0.25	17.4	-	-
Under-burden 4 (carbonati)		1671.87	687.16	984.71	2.770E-06	0.35	22.5	-	-
Under-burden 5	7400.3	1848.31	747.75	1100.56	2.770E-06	0.35	22.5	-	-



## 2.4 Inizializzazione e storia di pressione

### 2.4.1 Stato tensionale iniziale

Lo sforzo verticale totale  $\sigma_v$  iniziale è stato definito a partire dal profilo di densità calcolato seguendo il procedimento descritto nel paragrafo 2.3.1.

Invece, lo stato di sforzo orizzontale efficace  $\sigma'_h$  è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico, così definite:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (5)$$

dove  $K_0$  denota il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.54 [7].

### 2.4.2 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale del campo di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello fluido-dinamico Eclipse, è stata imposta come condizione forzante nei nodi del modello FE corrispondenti ai livelli del giacimento e degli acquiferi connessi.

Le pressioni sono state importate in 38 step temporali, selezionati in modo tale che non si verificassero eccessive variazioni di pressione tra due intervalli successivi e che corrispondessero alle date in cui sono stati effettuati i *surveys* delle misure di compattazione.

### 3 Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico

Le previsioni di subsidenza fornite dal modello elasto-plastico agli elementi finiti sono riportate in Tabella 2 per quattro step temporali: 2011 (fase di produzione), 2018 (fine della produzione), 2033 (fase di post-produzione) e 2048 (fine della simulazione).

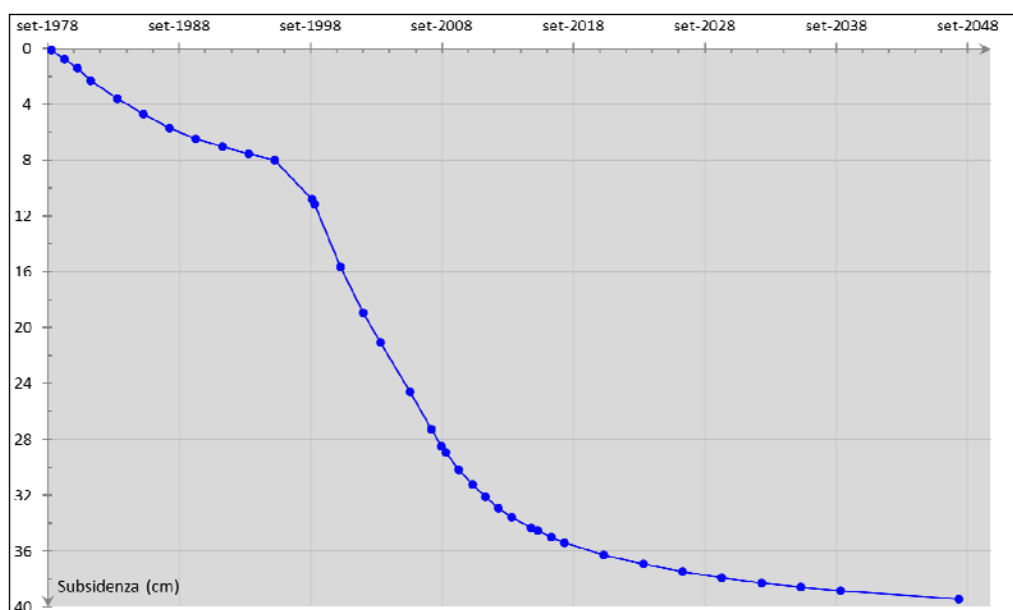
L'estensione della simulazione per i 30 anni successivi alla chiusura dei pozzi permette di stimare l'effetto dell'ulteriore evoluzione della pressione, nelle regioni mineralizzate e in acquifero, sugli spostamenti.

**Tabella 2 – Risultati: massima subsidenza, estensione e distanza dalla costa del fenomeno.**

		Gennaio 2011	Luglio 2018	Gennaio 2033	Gennaio 2048
Max Subsidenza	(cm)	32	36	38	39
Max Estensione	(km)	8	9	12	14
Min Distanza Costa		12	12	11	11

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza è pari a 39 cm ed è previsto nel 2048 in corrispondenza del punto di coordinate 2366.492 km E, 4899.497 km N (Figura 5);
- nel 2018 (fine produzione) la massima estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm è in direzione Nord-Ovest ed è pari a 9 km mentre raggiunge i 14 km circa al termine della simulazione (Tabella 2, Figura 6);
- il fenomeno si esaurisce a circa 11 km dalla linea di costa di Rimini (Figura 6 e Figura 7).



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

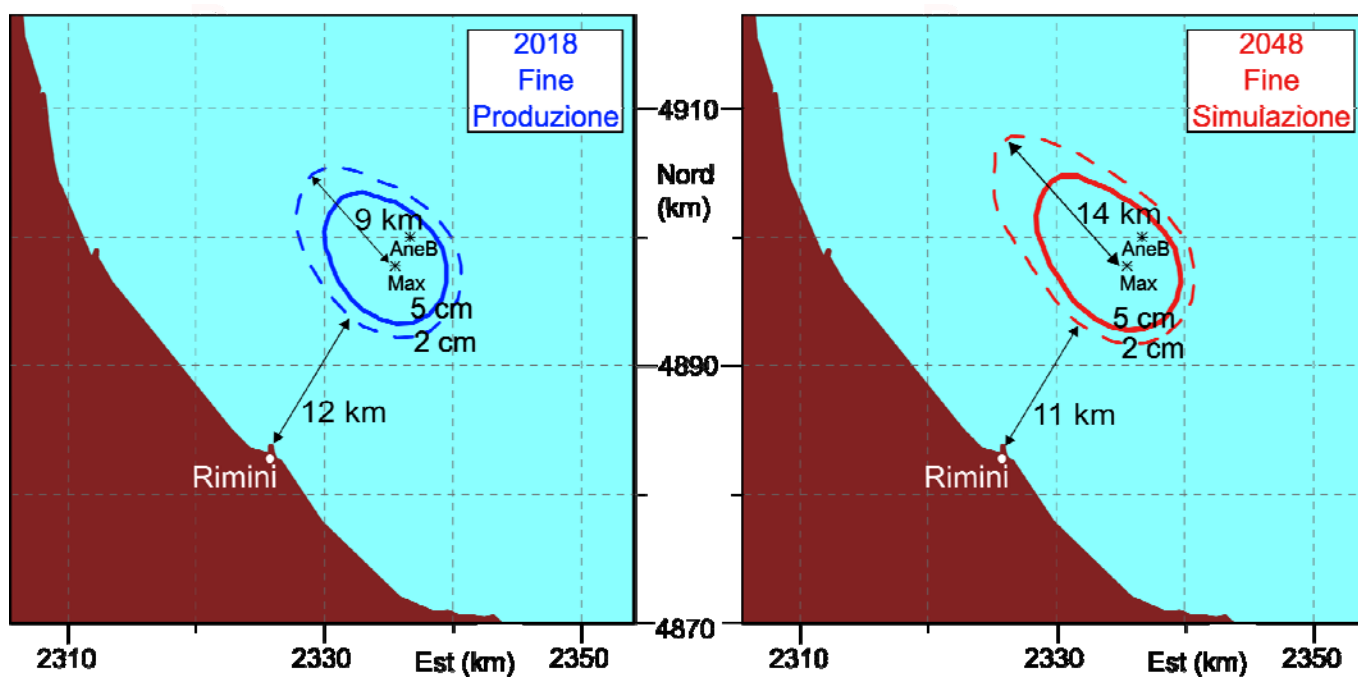


Figura 6 – Curve di iso-subsidenza dei 2 cm e dei 5 cm a fine produzione (01/07/2018) e a fine simulazione (01/01/2048).

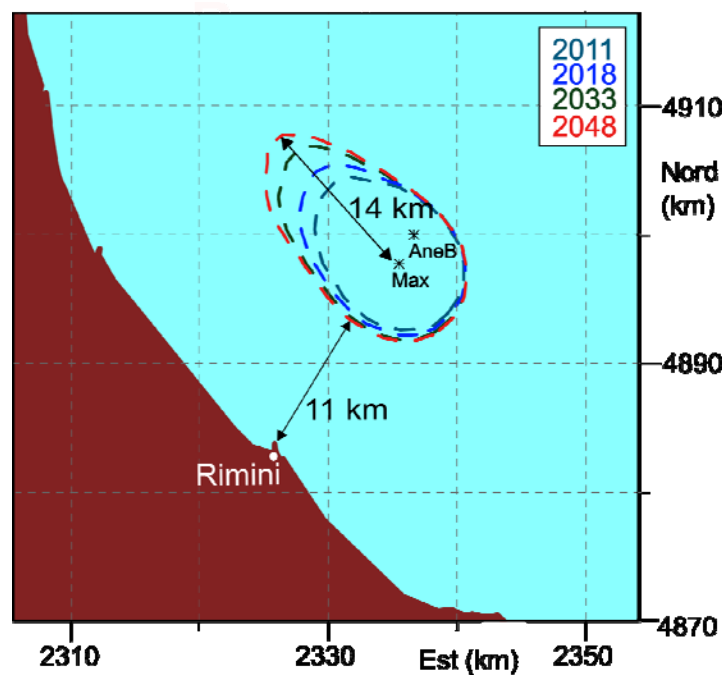


Figura 7 – Evoluzione nel tempo dell'estensione della curva di iso-subsidenza dei 2 cm.



## 4 Confronto con i dati delle stazioni CGPS

La piattaforma di produzione Anemone B si trova in corrispondenza del punto di coordinate 2336.692 km E e 4899.913 km N ed è equipaggiata di una stazione CGPS che ne ha registrato gli spostamenti da agosto 2007 a novembre 2014 (Figura 8). Secondo tali dati, durante il periodo di osservazione la velocità media di subsidenza è stata pari a 4.93 mm/anno.

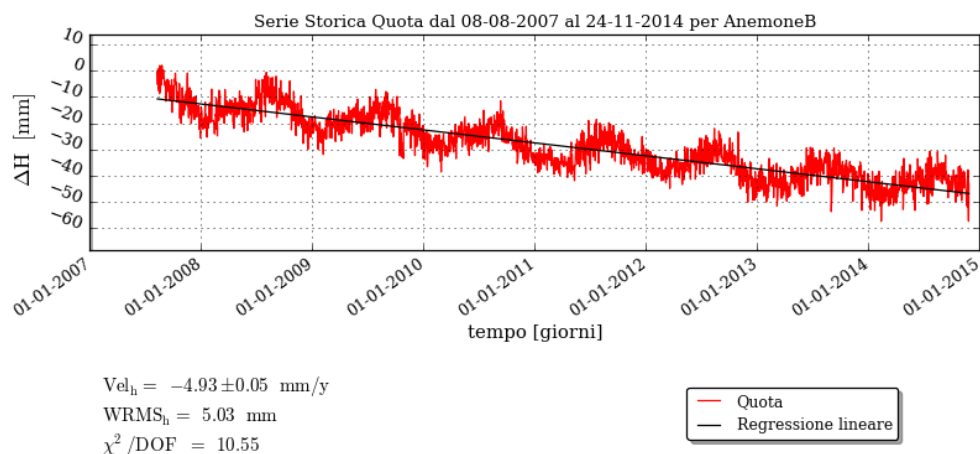


Figura 8 – Misurazioni della stazione CGPS di Anemone, aggiornate al 24/11/2014 (ultimo dato disponibile).

Si ricorda che, nel presente studio, è stata calibrata una legge di compressibilità che ha permesso al modello numerico di riprodurre con accuratezza gli spostamenti registrati dalla stazione CGPS (Figura 9).

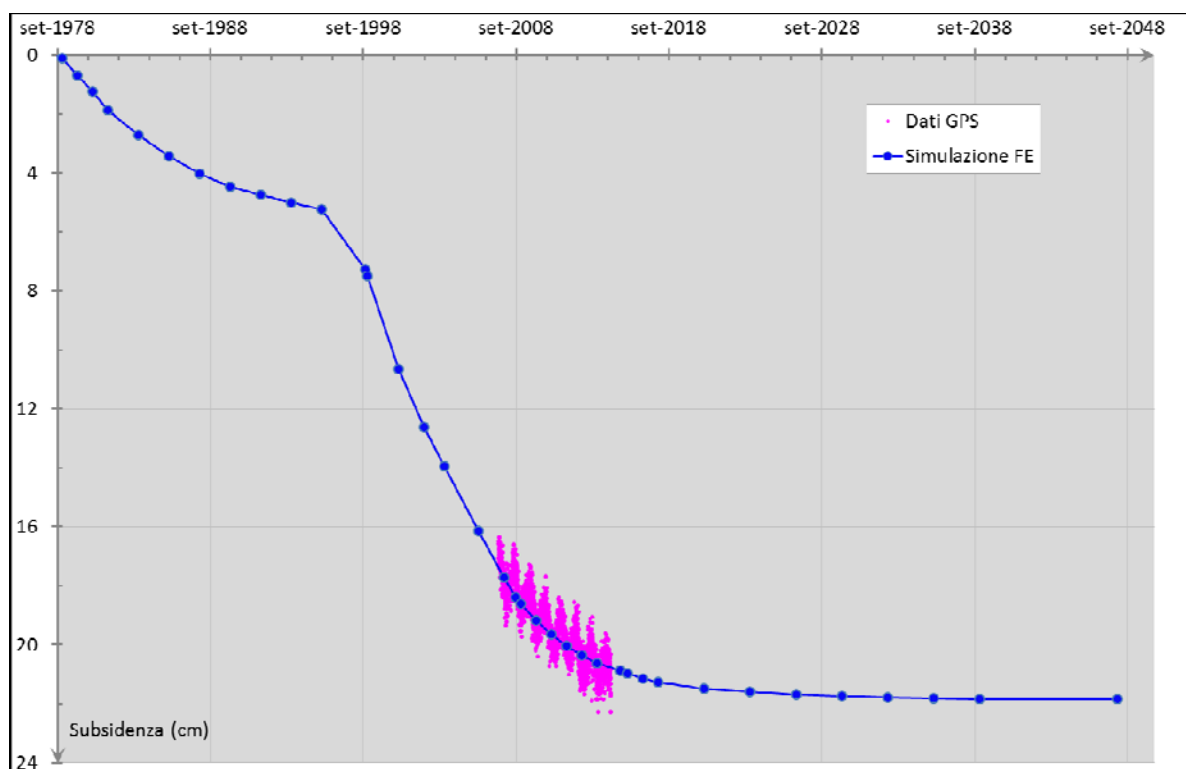



Figura 9 – Spostamento verticale della piattaforma Anemone B: dati GPS e risultati simulazione FE.

	<b>eni s.p.a</b> <b>Development,</b> <b>Operations &amp;</b> <b>Technology</b>	Campo di Anemone – Modello Elasto-Plastico di Subsidenza Management Summary	Pagina 18 di 18
---	---	--	-----------------

## 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 24/04/ 2013).
2. Abaqus<sup>TM</sup>, Dassault, versione 6.13.
3. Eclipse<sup>TM</sup>, Schlumberger, versione 2012.2.
4. Campo di Anemone– Aggiornamento Studio di giacimento – Scheda riassuntiva – GISE 18/15. Dicembre 2015.
5. D. Baù, M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini: *Basin-scale compressibility of the northern Adriatic by the radioactive marker technique*. Géotechnique 52, No. 8, 605–616, 2002.
6. T. Hueckel, G. Cassiani, J.H. Prévost and D.A. Walters: *Field Derived Compressibility of Deep Sediments of the Northern Adriatic*. *Land Subsidence*, Special Volume, Proc. 7th Int. Symp. on Land Subsidence, Shanghai, 2005.
7. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino: *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala* - 04/1996.