Campo di Naide

Modello Elasto-Plastico di Subsidenza

Management Summary

LISTA DI DISTRIBUZIONE:

GEOD/CS

GEOES/CS

AUTORI

R. Colombo — TENC

S. Monaco — TENC

Data: 15 febbraio 2017

AGGIORNAMENTI		CONTROLLATO DA	APPROVATO DA
0	Rapporto Finale	M. C. Dacome S. Mantica	M. Antonelli A. Tiani

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 5
2.3.1 Densità della roccia 5
2.3.2 Peso specifico dei fluidi saturanti 6
2.3.3 Compressibilità uniassiale: calibrazione con i dati misurati 6
2.4 Inizializzazione e storia di pressione 10
2.4.1 Stato tensionale iniziale 10
2.4.2 Storia di pressione 10
3 Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico 11
4 Confronto con dati da stazione CGPS 14
5 Bibliografia 15

1 Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo al campo di Naide, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento. Il campo di Naide è situato nell'offshore romagnolo (Figura 1), ad una distanza di 33 km dalla costa; la profondità del fondale marino è di circa 35 m.

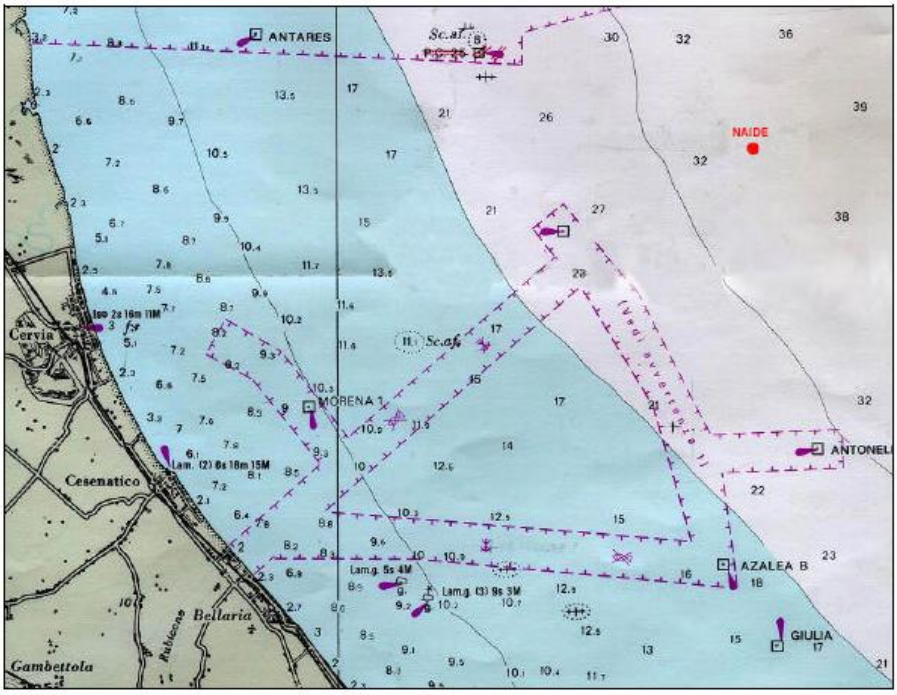

Figura 1 – Posizione del campo di Naide.

La previsione di subsidenza è stata ottenuta da una serie di simulazioni ad elementi finiti (FE) eseguite con il codice di calcolo Abaqus [1]. Le informazioni relative alla geometria del giacimento, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dallo studio fluido-dinamico di giacimento [2] realizzato con il codice di calcolo Eclipse [3].
La produzione è iniziata nel 2005 ed è previsto che terminerà nel 2020.

2 Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti

2.1 Approccio metodologico

Lo studio geomeccanico di subsidenza è stato condotto utilizzando il codice agli Elementi Finiti (FE) Abaqus [1]. La costruzione del modello è stata basata sulle seguenti informazioni:

- Mappe geologiche dei livelli interessati dal campo, estese in misura tale da descrivere interamente non solo la zona mineralizzata ma anche gli acquiferi laterali;
- Dettagliata descrizione della geometria e geologia dei livelli mineralizzati e degli acquiferi connessi, riprodotta con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica;
- Distribuzione di pressione nei livelli mineralizzati e negli acquiferi connessi, calcolata con il modello di flusso 3D Eclipse. Lo studio fluido-dinamico di giacimento è stato comunque protratto fino al 2050 (a pozzi chiusi) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione;
- Proprietà meccaniche della roccia descritte con una legge costitutiva del tipo Cam Clay Modificato, che tiene conto non solo della variazione della compressibilità uniassiale (c_m) con lo stress 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 fatto sulla base dello spessore gross degli stessi.

Le compressibilità dei materiali nella regione del giacimento sono state calibrate affinché i risultati del modello Abaqus riproducessero gli spostamenti verticali registrati dalla stazione CGPS posta sulla piattaforma di produzione.

2.2 Geometria del modello

Il modello Eclipse è composto da 140x98x83 celle nelle direzioni I, J e K rispettivamente, per un totale di oltre 1 milione di celle, delle quali circa 100578 sono attive. Esso interessa un'area di circa 26x20 km^2. 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 49x45 km^2.
Data l'estensione risultante, è stato necessario effettuare un processo di *upscaling* per limitare il numero dei gradi di libertà. In particolare, mentre la struttura verticale del modello Abaqus è stata mantenuta identica al modello Eclipse per la zona attiva del giacimento, in direzione orizzontale è stato attuato un processo di *upscaling* unendo tra loro un differente numero di celle in funzione della distanza dal centro del giacimento e delle dimensioni delle celle stesse. E' importante notare che nell'intorno dei pozzi produttori la griglia non è stata modificata in direzione orizzontale.
La griglia originale, inoltre, è stata estesa verticalmente in modo da comprendere la regione che va dal fondo mare fino ad una profondità di 5000 m. Il modello è stato diviso in 5 layer dal *top* del

giacimento fino alla superficie (*overburden*) e in 5 layer dal *bottom* del giacimento fino alla base (*underburden*), come mostrato in Figura 2.

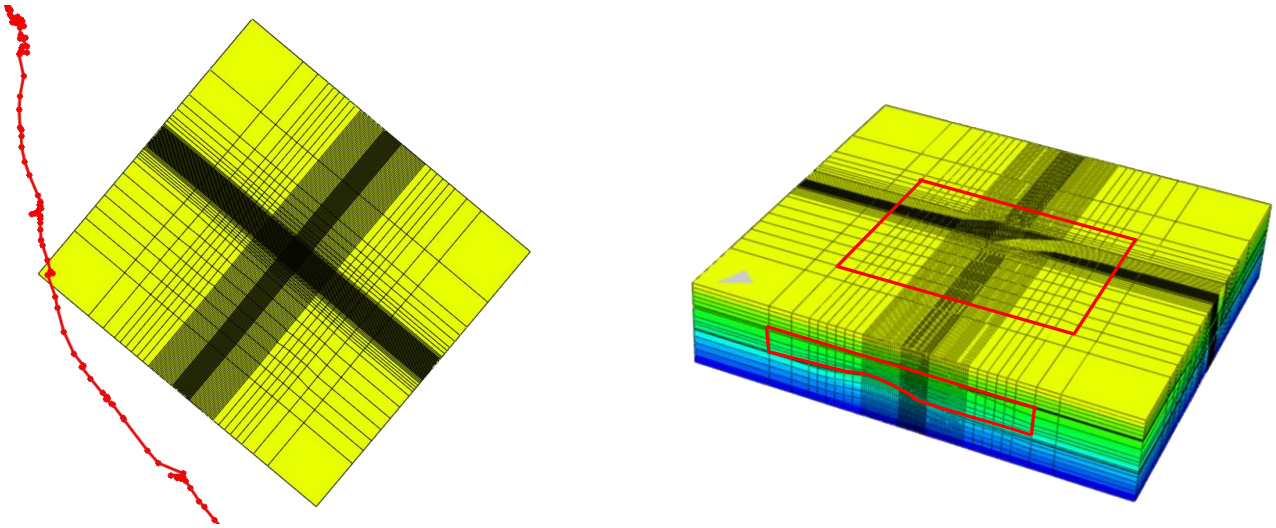

Figura 2 – Confronto tra l'estensione del modello geomeccanico e del modello dinamico (rosso). A sinistra è evidenziata la linea di costa.

La griglia FE risulta così costituita da 87x66x36 (206712) elementi e 218152 nodi per un totale di 701504 gradi di libertà.
Le condizioni al contorno assegnate al modello sono di spostamento nullo alla base della griglia e spostamento orizzontale impedito lateralmente.

2.3 Proprietà dei materiali

2.3.1 Densità della roccia

Partendo dai density log dei pozzi Naide1 e Naide2 è stato possibile calcolare un profilo continuo di densità (Figura 3) definito attraverso la seguente relazione:

$$\rho(z)=1422.7\cdot(z-z_{fm})^{0.0638} \quad \textbf{(1)}$$

ove ρ è la densità della roccia espressa in kg/m^3, z è la profondità (in metri) riferita al livello medio del mare, z_{fm} è la profondità (in metri) del fondo mare pari, in questo caso, a 35 m.

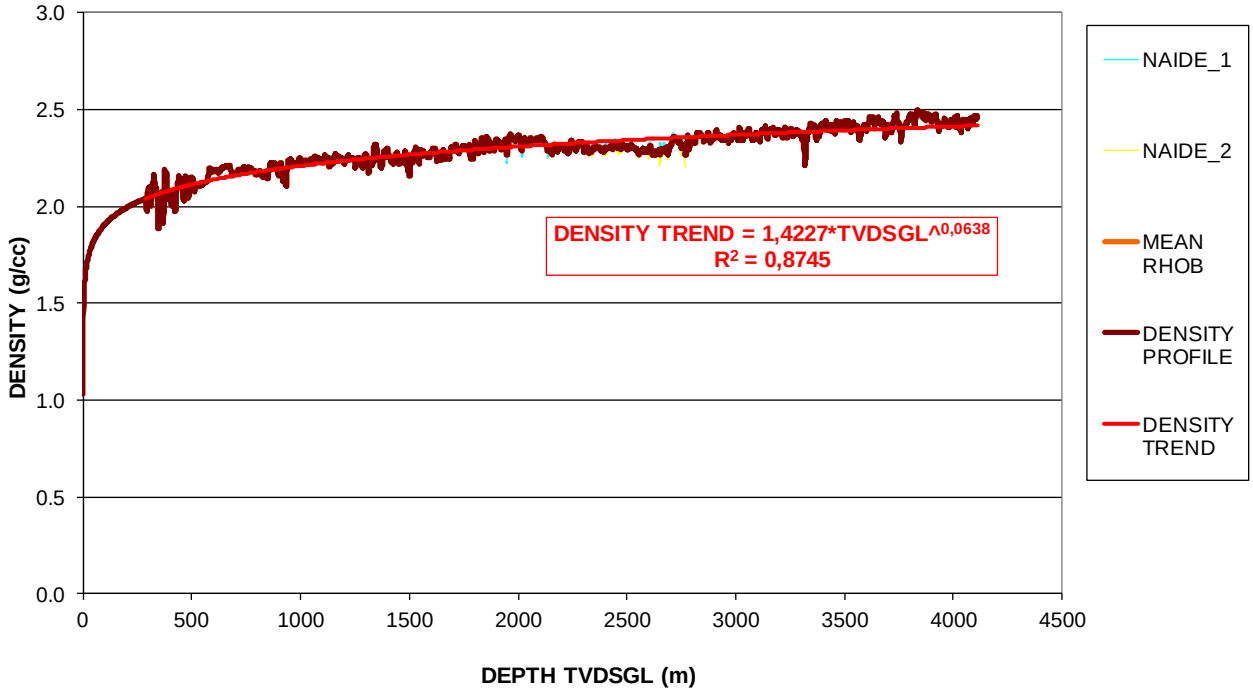

Figura 3 – Profilo del density log e funzione di regressione in funzione della profondità da fondo mare.

La densità della roccia è stata fornita al modello FE in forma tabulare come funzione della profondità secondo la precedente relazione.
Partendo da tali density log è stato inoltre derivato l'andamento dello sforzo verticale totale:

$$\sigma_v(z) = (1422.7/1.0638 \cdot (z - z_{fm})^{1.0638} + z_{fm} \cdot \rho_w \cdot g) \cdot 10^{-5} \quad \textbf{(2)}$$

dove σ_v è lo sforzo verticale totale espresso in bar, z è la profondità (in metri) riferita al livello medio del mare, z_{fm} è la profondità (in metri) del fondo mare pari, in questo caso, a 35 m, ρ_w è la densità dell'acqua assunta pari a 1030 kg/m^3 e g è l'accelerazione di gravità.

2.3.2 Peso specifico dei fluidi saturanti

Viene fornito al modello FE il valore del peso specifico γ_f dei fluidi saturanti. Per ciascuna regione idro-meccanica 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.

2.3.3 Compressibilità uniassiale: calibrazione con i dati misurati

Il parametro geomeccanico chiave nelle simulazioni di subsidenza è la compressibilità uniassiale c_m del materiale. Generalmente, le proprietà meccaniche dei giacimenti dell'area adriatica sono assegnate secondo la relazione tra c_m e tensione verticale efficace σ'_v proposta da *Hueckel et al.* in [4] dove è riportata la miglior stima:

$$c_m = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \quad \textbf{(3)}$$

Nella relazione (3) σ'_v è la tensione efficace verticale espressa in bar e c_m è il coefficiente di compressibilità edometrica espresso in bar^{-1}.
Generalmente, al fine di effettuare un'analisi parametrica, oltre alla relazione (3) che fa riferimento allo scenario medio, vengono considerate anche le leggi di compressibilità relative al quantile inferiore e superiore:

- quantile 2.5% – scenario lower:

$$c_m = 0.01367 \cdot 10^{-0.467} \cdot \left(\sigma'_v\right)^{-1.16434} \quad \textbf{(4)}$$

- quantile 97.5% – scenario upper:

$$c_m = 0.01367 \cdot 10^{0.467} \cdot \left(\sigma'_v\right)^{-1.16434} \quad \textbf{(5)}$$

La tensione verticale efficace viene calcolata tramite:

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad \textbf{(6)}$$

dove σ_v è la tensione verticale totale e p la pressione dei pori. La pressione dei pori viene estratta dallo studio fluido-dinamico alla profondità di riferimento, mentre la tensione verticale totale σ_v viene calcolata a partire dalla densità del materiale.
Studi recenti [5] hanno evidenziato come la relazione (3) di Hueckel *et al.* [4] tenda a sottostimare la compressibilità uniassiale dei sedimenti posti a meno di 1500 m di profondità. Per tener conto di ciò, ovvero per profondità inferiori a 1500 m, *Ferronato et al.* [5] hanno proposto che, in via cautelativa, il valore di c_m ottenuto dalla (3) sia moltiplicato per 2:

$$c_m = \begin{cases} 2 \cdot 0.01367 \cdot \left(\sigma'_v\right)^{-1.16434} & z < 1500m \\ 0.01367 \cdot \left(\sigma'_v\right)^{-1.16434} & z \geq 1500m \end{cases} \quad \textbf{(7)}$$

Le leggi sopra definite, che descrivono una serie di rette nel piano bilogaritmico c_m:σ'_v , sono riportate in Figura 4.

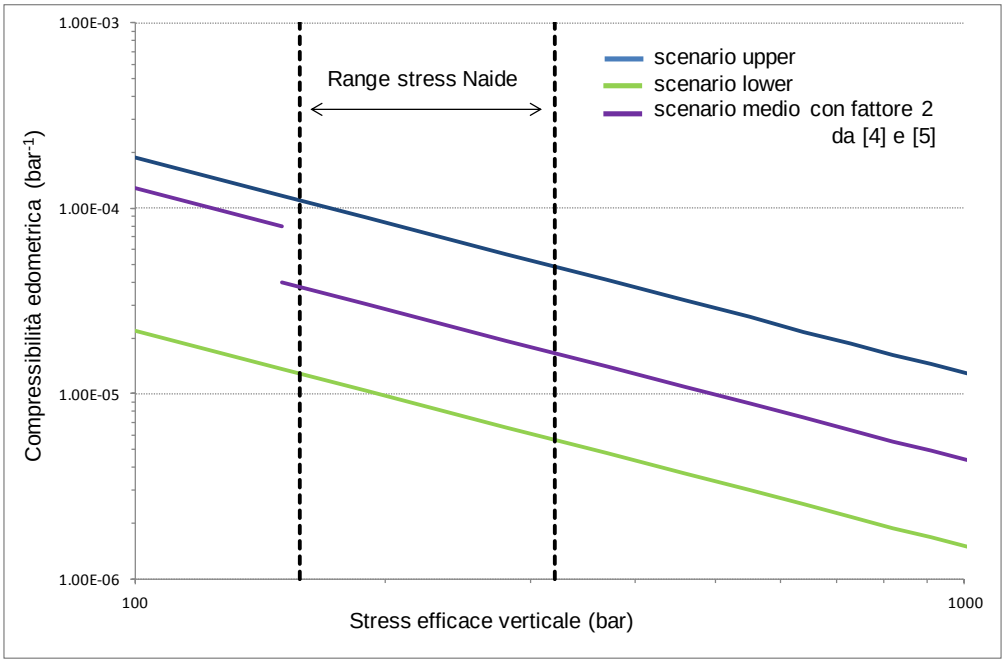

Figura 4 – Correlazione tra la compressibilità uniassiale c_m e lo stress efficace *in situ*, derivata da misure su marker nei campi a gas del bacino nord adriatico da [4], corretta secondo [5].

Nel presente studio, al fine di riprodurre gli spostamenti misurati in corrispondenza di una stazione GPS installata sulla piattaforma di Naide, è stata implementata una legge di variazione della compressibilità uniassiale con lo stress efficace specifica per il campo in oggetto.
In particolare, è stata mantenuta la pendenza (nel piano bilogaritmico c_m:σ'_v) delle relazioni sopra definite, ed è stata fatta variare l'intercetta all'interno del range rappresentato in Figura 4 fino ad ottenere un match adeguato. La legge così determinata è stata quindi utilizzata per generare i valori di compressibilità uniassiale adottati nel presente studio (Figura 5):

legge calibrata $$c_m = 1.35 \cdot 0.01367 \cdot \left(\sigma'_v\right)^{-1.16434} \quad \textbf{(8)}$$

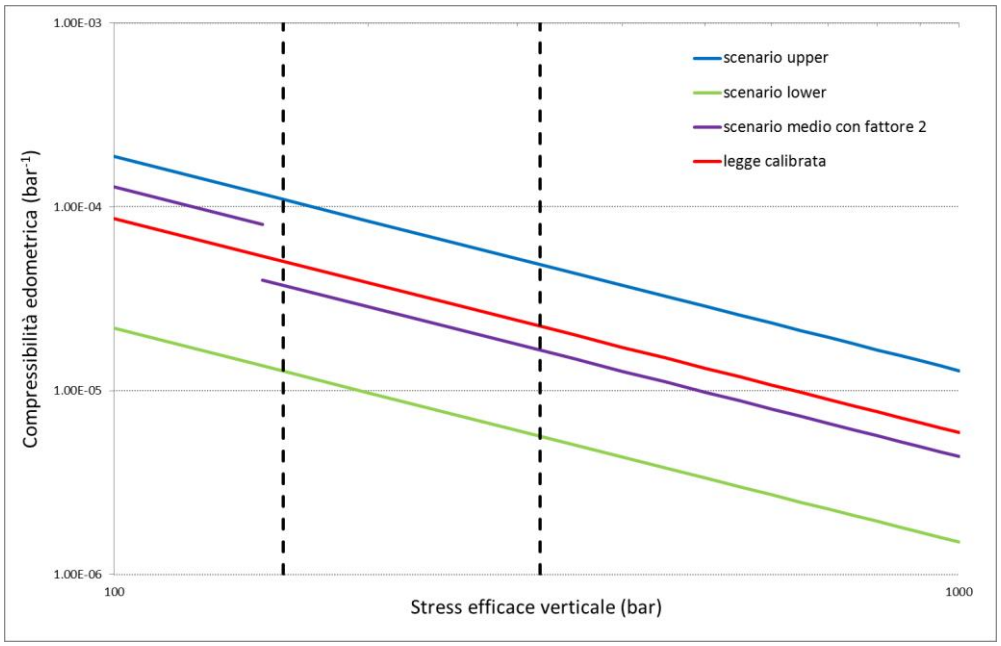

Figura 5 – Legge di variazione della compressibilità edometrica calibrata per il campo di Naide.

I campi di pressione del modello Eclipse sono stati stimati utilizzando compressibilità dei pori consistenti con il modello geomeccanico. Questa procedura garantisce assoluta consistenza tra le proprietà geomeccaniche utilizzate nel modello di giacimento e quelle adottate nel modello geomeccanico.

In Tabella 1 sono riportati i valori di compressibilità uniassiale (c_m), coefficiente di Poisson (ν), modulo di Young (E), pendenza della retta di normal-compressione (λ) e di scarico-ricarico (κ) nel piano *e:lnp'* (dove *e* è l'indice dei vuoti e *p'* è la tensione efficace media) assegnati ai vari livelli nel modello geomeccanico. Per ogni layer sono anche indicati i valori di profondità media (*z media*), tensione verticale totale (σ_v), pressione dei pori (p) e tensione verticale efficace (σ'_v).

Layer		Z media (m)	σv (bar)	p (bar)	σ'v (bar)	cm (bar^-1)	v (-)	E (bar)	λ (-)	k (-)
Overburden	1	184.2	30.5	18.6	11.9	1.04E-03	0.3	7.17E+02	-	-
Overburden	2	482.6	90.2	48.8	41.5	2.41E-04	0.3	3.08E+03	-	-
Overburden	3	781.0	152.8	78.9	73.9	1.23E-04	0.3	6.03E+03	-	-
Overburden	4	1079.4	217.0	109.1	108.0	7.92E-05	0.3	9.38E+03	-	-
Overburden	5	1377.8	282.5	139.2	143.3	5.70E-05	0.3	1.30E+04	-	-
Reservoir	1	1564.5	323.9	165.4	158.5	5.06E-05	0.3	1.47E+04	1.07E-02	3.53E-03
Reservoir	2	1564.5	323.9	165.4	158.5	5.06E-05	0.3	1.47E+04	1.07E-02	3.53E-03
Reservoir	3	1564.5	323.9	165.4	158.5	5.06E-05	0.3	1.47E+04	1.07E-02	3.53E-03
Reservoir	4	1564.5	323.9	165.4	158.5	5.06E-05	0.3	1.47E+04	1.07E-02	3.53E-03
Reservoir	5	1564.5	323.9	165.4	158.5	5.06E-05	0.3	1.47E+04	-	-
Reservoir	6	1564.5	323.9	165.4	158.5	5.06E-05	0.3	1.47E+04	-	-
Reservoir	7	1614.1	335.0	173.2	161.8	4.95E-05	0.3	1.50E+04	1.07E-02	3.52E-03
Reservoir	8	1614.1	335.0	173.2	161.8	4.95E-05	0.3	1.50E+04	1.07E-02	3.52E-03
Reservoir	9	1614.1	335.0	173.2	161.8	4.95E-05	0.3	1.50E+04	1.07E-02	3.52E-03
Reservoir	10	1614.1	335.0	173.2	161.8	4.95E-05	0.3	1.50E+04	1.07E-02	3.52E-03
Reservoir	11	1614.1	335.0	173.2	161.8	4.95E-05	0.3	1.50E+04	-	-
Reservoir	12	1631.1	338.8	176.0	162.8	4.91E-05	0.3	1.51E+04	1.07E-02	3.52E-03
Reservoir	13	1631.1	338.8	176.0	162.8	4.91E-05	0.3	1.51E+04	1.07E-02	3.52E-03
Reservoir	14	1631.1	338.8	176.0	162.8	4.91E-05	0.3	1.51E+04	1.07E-02	3.52E-03
Reservoir	15	1631.1	338.8	176.0	162.8	4.91E-05	0.3	1.51E+04	1.07E-02	3.52E-03
Reservoir	16	1631.1	338.8	176.0	162.8	4.91E-05	0.3	1.51E+04	-	-
Reservoir	17	1631.1	338.8	176.0	162.8	4.91E-05	0.3	1.51E+04	-	-
Reservoir	18	1631.1	338.8	176.0	162.8	4.91E-05	0.3	1.51E+04	-	-
Reservoir	19	1631.1	338.8	176.0	162.8	4.91E-05	0.3	1.51E+04	-	-
Reservoir	20	1631.1	338.8	176.0	162.8	4.91E-05	0.3	1.51E+04	-	-
Reservoir	21	2773.9	598.9	301.7	297.2	2.44E-05	0.3	3.05E+04	8.88E-03	2.93E-03
Reservoir	22	2773.9	598.9	301.7	297.2	2.44E-05	0.3	3.05E+04	-	-
Reservoir	23	2929.3	634.9	318.8	316.1	2.27E-05	0.3	3.28E+04	8.80E-03	8.80E-03
Reservoir	24	2936.2	636.5	319.2	317.3	2.26E-05	0.3	3.29E+04	8.80E-03	8.80E-03
Reservoir	25	2944.2	638.4	319.0	319.4	2.24E-05	0.3	3.32E+04	8.73E-03	2.88E-03
Reservoir	26	2944.2	638.4	319.0	319.4	2.24E-05	0.3	3.32E+04	-	-
Underburden	1	3380.0	740.0	341.5	398.5	1.73E-05	0.3	4.29E+04	-	-
Underburden	2	3740.0	824.6	377.9	446.7	1.52E-05	0.3	4.90E+04	-	-
Underburden	3	4100.0	909.8	414.3	495.5	1.34E-05	0.3	5.53E+04	-	-
Underburden	4	4460.0	995.4	450.7	544.7	1.20E-05	0.3	6.18E+04	-	-
Underburden	5	4820.0	1081.4	487.0	594.4	1.09E-05	0.3	6.84E+04	-	-

Tabella 1 – Proprietà assegnate, regione per regione, nel modello geomeccanico di Naide.

2.4 Inizializzazione e storia di pressione

2.4.1 Stato tensionale iniziale

Per il campo di Naide lo sforzo totale verticale è stato calcolato dal gradiente di overburden definito dai log density eseguiti su Naide1 e Naide2 (come descritto nel paragrafo 2.3.1). Lo sforzo orizzontale σ'_h è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico definite come:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \qquad \textbf{(9)}$$

dove K_0 rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.54 [6].

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 importata nel modello ad elementi finiti. Le pressioni sono state importate per un totale di 23 step temporali.

3 Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico

In questo paragrafo vengono riportati i risultati dello studio geomeccanico in termini di subsidenza indotta dalla coltivazione del campo di Naide. I risultati delle previsioni di subsidenza sono riportati in Tabella 2 per diversi step temporali durante e dopo la vita produttiva del campo. Lo studio è stato infatti protratto fino al 2050 (a pozzi chiusi) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.

01/01/2010		01/01/2017		31/12/2020		01/01/2051	
Max subsidenza (cm)	Max estensione (Km)	Max subsidenza (cm)	Max estensione (Km)	Max subsidenza (cm)	Max estensione (Km)	Max subsidenza (cm)	Max estensione (Km)
4	2	7	3	8	3	8	3

Tabella 2 – Risultati finali: massima subsidenza ed estensione del fenomeno.

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza previsto risulta pari a 8 cm, è raggiunto al 2020 e si mantiene pressoché costante nei 30 anni successivi. La Figura 6 mostra la mappa di subsidenza alla fine della produzione (31/12/2020), mentre in Figura 7 è riportata l'evoluzione nel tempo della subsidenza relativa al punto nel quale si registra il valore massimo di subsidenza e che corrisponde alle coordinate[1] 2341519.5 m E, 4913926.5 m N;

- al 2020 la massima estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm, calcolata come distanza del punto di massima subsidenza dalla linea dei 2 cm, è pari a 3 km; tale valore rimane immutato per i 30 anni successivi (fino al 2050) in cui la simulazione è stata protratta a pozzi chiusi a dimostrazione dell'assestamento del fenomeno (Figura 8);

- il fenomeno si esaurisce a circa 30 km dalla linea di costa (Figura 6 e Figura 8).

[1] Proiezione Gauss Boaga, fuso Est, Ellissoide Internazionale.

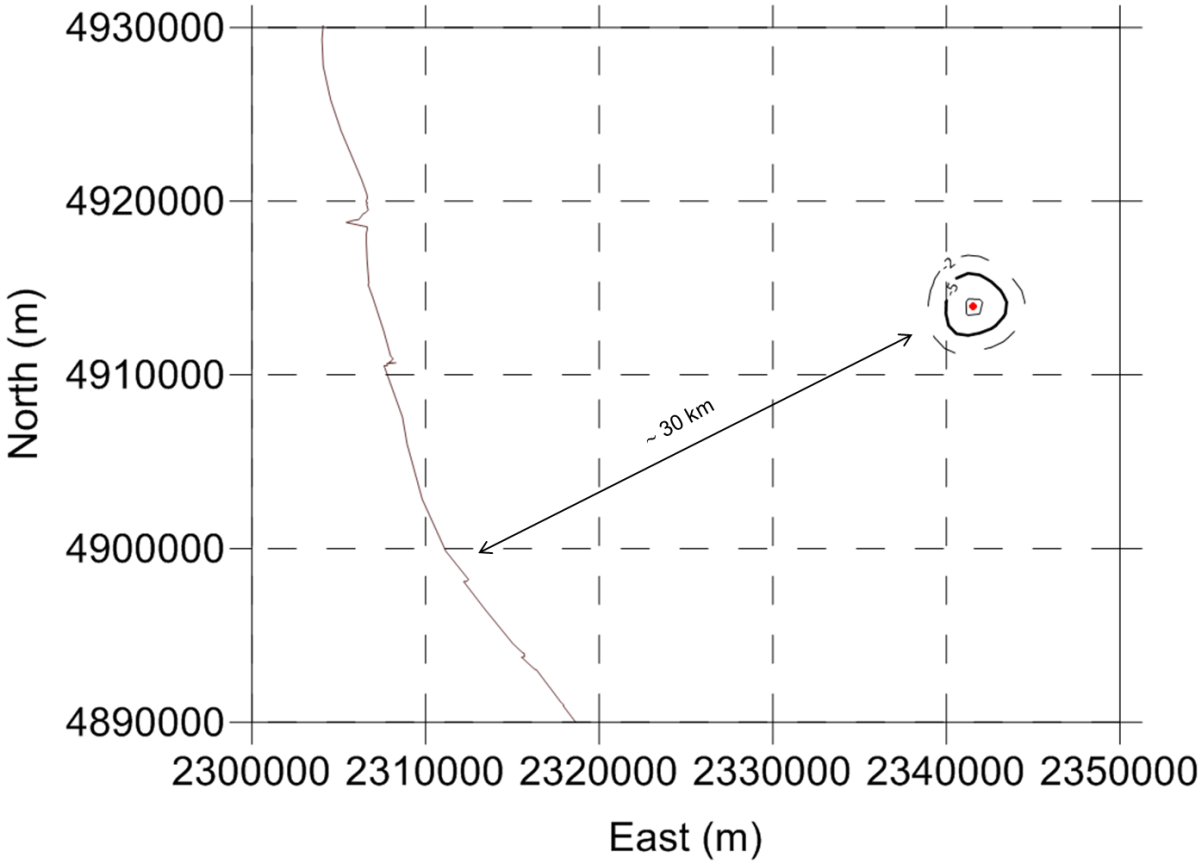

Figura 6 – Curve di iso-subsidenza a fine produzione (2020).

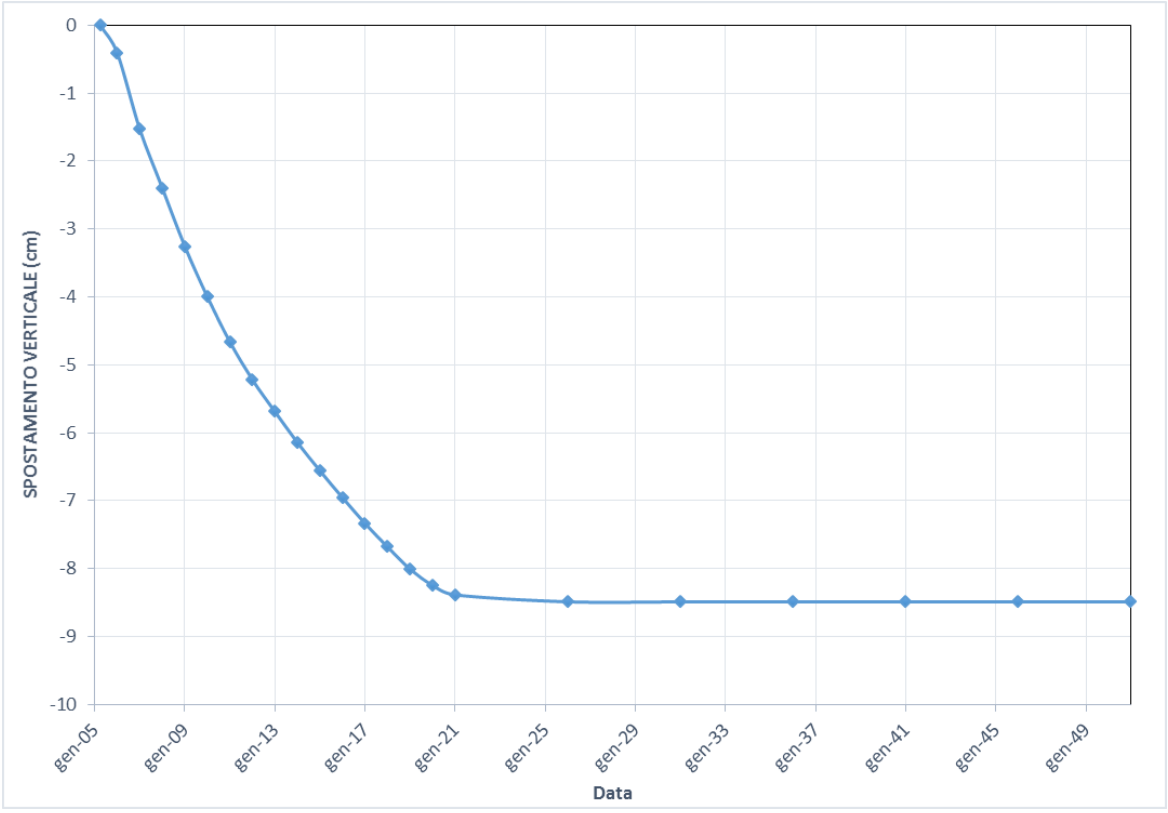

Figura 7 – Evoluzione nel tempo del valore di massima subsidenza.

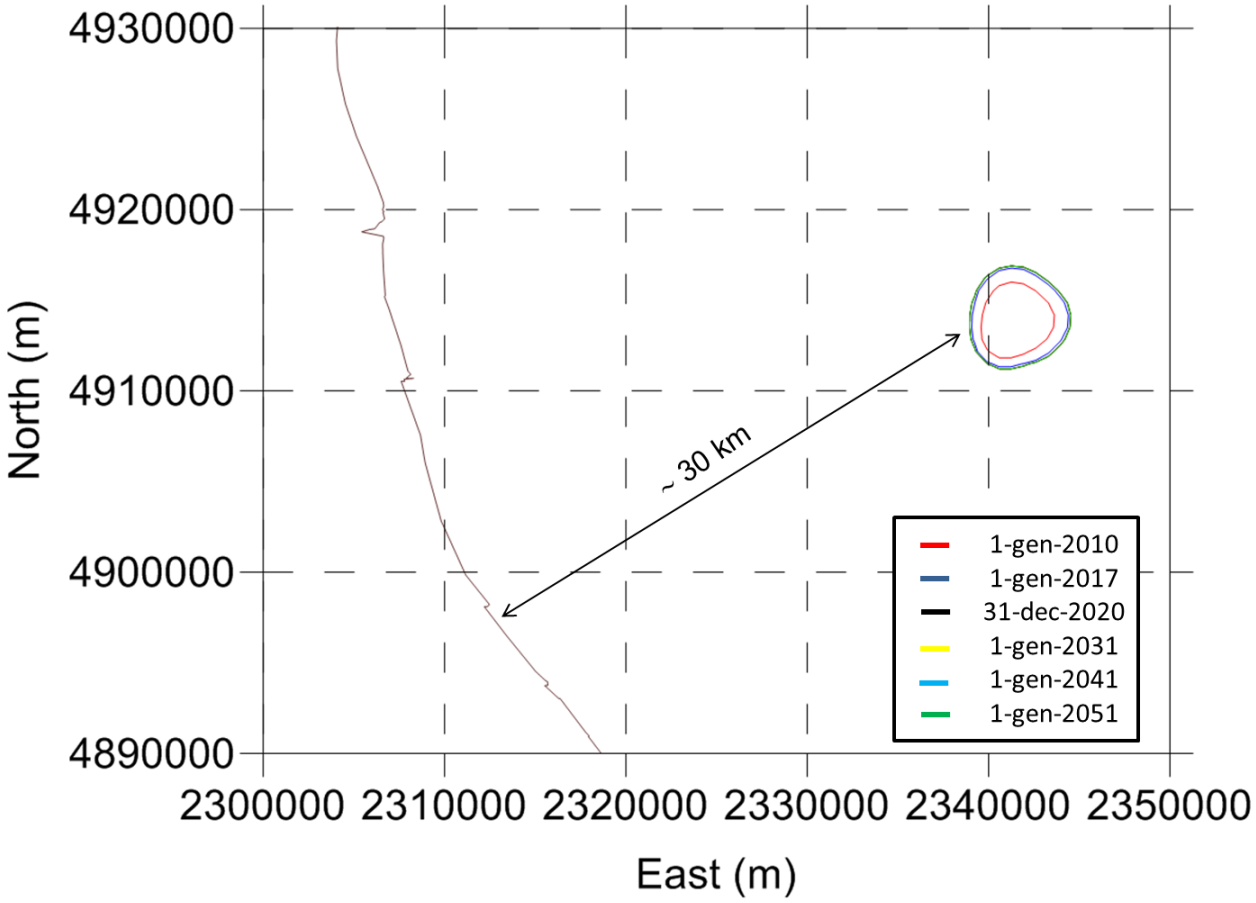

Figura 8 – Evoluzione nel tempo della linea di iso-subsidenza dei 2 cm.

4 Confronto con dati da stazione CGPS

I valori di subsidenza estratti dal modello numerico sono stati confrontati con quelli misurati dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma di produzione in corrispondenza delle coordinate[1] 4912477.2 m N, 2340286.6 m E. A partire da tali misurazioni (Figura 9) si può calcolare un valore medio di velocità di subsidenza pari a 3.45 mm/anno.

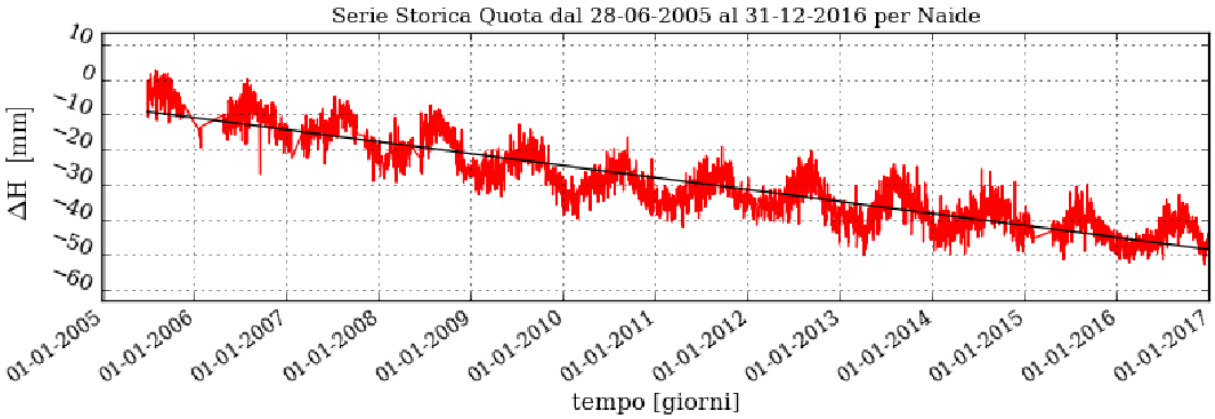

Figura 9 – Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS, aggiornate a dicembre 2016.

Si ricorda che nel presente studio è stata calibrata una legge di variazione della compressibilità edometrica con lo stress efficace che ha permesso di riprodurre con accuratezza gli spostamenti registrati dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma di Naide, come è possibile osservare dalla Figura 10. E' importante notare che, in assenza di informazioni dettagliate sull'entità della subsidenza naturale della regione in cui si colloca il giacimento di Naide, e non essendo possibile estrapolare, data l'elevata distanza dalla costa, i valori dalla mappa di Salvioni [7], tale componente non è stata sottratta alle misurazioni della stazione CGPS.

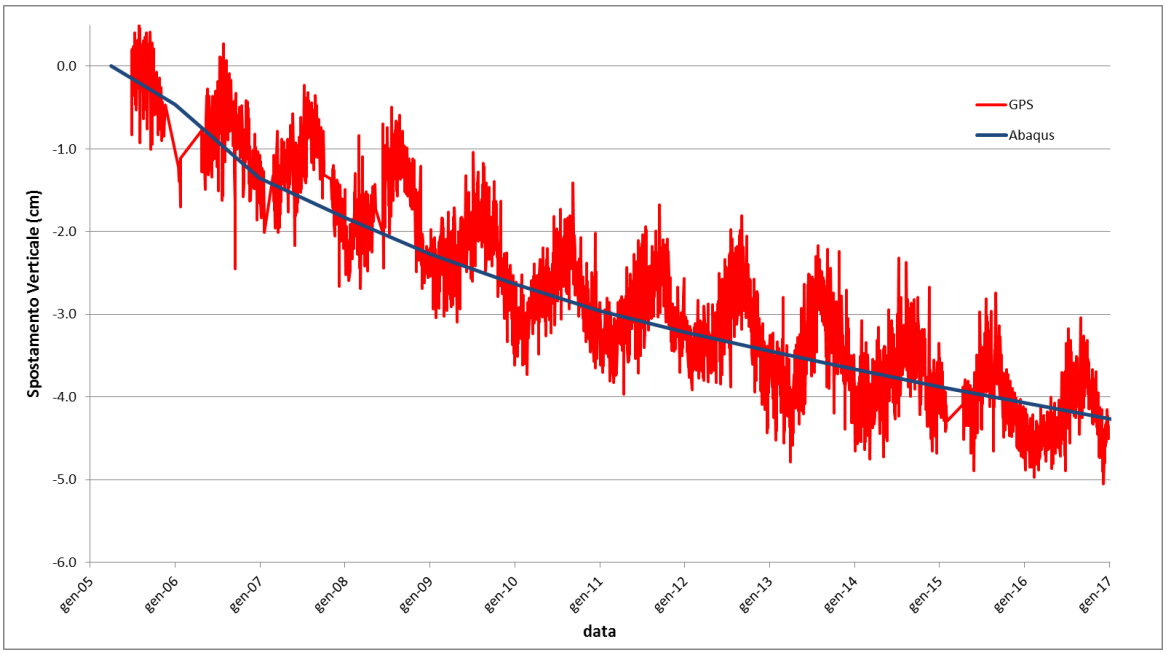

Figura 10 – Spostamento misurato e calcolato in corrispondenza della stazione CGPS.

[1] Proiezione Gauss Boaga, fuso Est, Ellissoide Internazionale

5 Bibliografia

1. Abaqus™, Dassault, versione 6.14-5.
2. *Campo di Naide – Studio di giacimento – Scheda riassuntiva* – Relazione TENC 05/2017.
3. Eclipse™, Schlumberger, versione 2015.2.
4. 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.
5. M. Ferronato, G. Gambolati, P. Teatini and D. Baù: *Interpretation of Radioactive Marker Measurements To Evaluate Compaction in the Northern Adriatic Gas Field*, SPE Evaluation & Engineering, December 2003.
6. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino: *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala* - 04/1996.
7. G. Salvioni, *I movimenti del suolo nell'Italia centro-settentrionale*, Boll. Geodesia e Scienze Affini, 1957, XVI, 3, 325-366.