

REGIONE EMILIA ROMAGNA PROVINCIA DI FERRARA Comune di Comacchio

Istanza di Concessione di Coltivazione Agosta

Messa in produzione del pozzo Agosta 1 Dir

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

APPENDICE C – STUDIO E PIANO DI MONITORAGGIO SUBSIDENZA

Rev.

INDICE

- 1 Management Summary
- 2 Piano di monitoraggio dei fenomeni geodinamici



Campi di Agosta e Dosso degli Angeli: studio di subsidenza							
		Management Summar	.У				
LISTA DI DIS	STRIBUZION	Е:					
GEOD/CS							
GEOES/CS							
AUTORI							
F. Bottazzi	in the second		TENC				
-							
	· _ ·						
Data: 22/05/20	15 Domestic						
0	Finale	M. C. Dacome S. Mantica Mun Pare	P. Casini Ropa Dele 65- Pro- M. Rotondi				
AGGIORN	AMENTI	CONTROLLATO DA	APPROVATO DA				



Indice

Indice	2
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 Stress verticale	6
2.3.2 Compressibilità uniassiale	7
2.4 Inizializzazione	.12
2.4.1 Stato tensionale iniziale	.12
2.5 Storia di pressione	.12
3 Risultati delle simulazioni	.13
4 Confronto con i dati disponibili	.20
5 Effetti della produzione del giacimento di Agosta	.23
Bibliografia	.28

1 Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo ai campi di Dosso degli Angeli, in produzione dal 1971, e di Agosta, la cui messa in produzione è prevista per giugno 2017. Il campo di Agosta è situato lungo il margine nordoccidentale delle valli di Comacchio, in Provincia di Ferrara, mentre il campo di Dosso degli Angeli si estende nell'area orientale delle medesime valli, a cavallo tra le due province di Ferrara e Ravenna (Figura 1).



Figura 1 – Ubicazione dei campi di Agosta e di Dosso degli Angeli.

La valutazione di subsidenza attesa è stata effettuata tramite l'applicazione del modello poro-elastoplastico ad elementi finiti proprietario di Isamgeo Engineering GmbH. Le informazioni relative alla geometria dei due giacimenti, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dagli studi fluido-dinamici di giacimento realizzati da Eni S.p.A. con il codice di calcolo Eclipse [1]. Data la separazione delle strutture che ospitano i giacimenti di Agosta e Dosso degli Angeli, è esclusa la comunicazione idraulica tra i due giacimenti ed è perciò stato possibile eseguire due studi dinamici separati. L'interazione meccanica è tenuta in debita considerazione mediante la costruzione di un unico modello integrato che comprende entrambi i giacimenti.

La data di fine produzione è stimata dal modello fluido-dinamico e, quindi, dipende anche dalla compressibilità dei pori. Per il campo di Agosta, come descritto nel §2.3.2, sono stati considerati tre diversi scenari, basati sulla correlazione regionale [6]. Il termine della produzione è pertanto previsto tra il 2030 e il 2033. Per il giacimento di Dosso degli Angeli invece, date le numerose misurazioni disponibili (CGPS, dati InSar e livellazioni), è stato adottato un unico valore di compressibilità dei pori e la fine della produzione è prevista al 2027. La simulazione è stata protratta per circa 30 anni dopo la chiusura dei campi in modo da considerare la propagazione del disturbo di pressione negli acquiferi connessi alla zona mineralizzata.

2 Modello geomeccanico agli Elementi Finiti

2.1 Approccio metodologico

Lo studio geomeccanico di subsidenza di Agosta e Dosso degli Angeli [5] è stato realizzato da ISAMGEO Engineering Gmbh utilizzando il codice proprietario ad Elementi Finiti (FE) Isamgeo. La costruzione del modello è stata basata sui seguenti dati:

- Modello geologico dei due campi, esteso in misura tale da descrivere interamente non solo le zone mineralizzate ma anche gli acquiferi ad esse idraulicamente connessi.
- Dettagliata descrizione della geometria e geologia dei "livelli mineralizzati + acquiferi connessi", riprodotta con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica.
- Distribuzione di pressione nei "livelli mineralizzati + acquiferi connessi", calcolata con il modello fluidodinamico 3D Eclipse. Lo studio fluido-dinamico di giacimento è stato comunque protratto (a pozzi chiusi) fino a circa 30 anni dopo la fine della produzione in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e negli acquiferi 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 (*cm*) con lo stress efficace, ma modella accuratamente anche gli eventuali fenomeni di espansione dei sedimenti soggetti a ripressurizzazione.
- Calcolo della compattazione dei "livelli mineralizzati + acquiferi connessi" fatto sulla base dello spessore gross degli stessi e della più aggiornata stima della compressibilità uniassiale ottenuta da misure in situ effettuate nei pozzi equipaggiati con markers nell'offshore adriatico.

2.2 Geometria del modello

Il modello del giacimento di Agosta, realizzato tramite il software Eclipse, rappresenta completamente la zona mineralizzata e gli acquiferi laterali. La griglia di calcolo si compone di 160 $\times 21 \times 56$ celle in direzione I, J, K rispettivamente, per un totale di 188160 celle, di cui 87953 attive e interessa un'area di circa 14x3 km².

Il modello fluido-dinamico relativo al campo di Dosso, anch'esso realizzato tramite il software Eclipse, si compone di una vasta area che comprende l'intera estensione degli acquiferi laterali al giacimento. La griglia di calcolo si compone di 97 \times 101 \times 21 blocchi in direzione I, J, K rispettivamente, per un totale di 205737 celle, di cui 125982 attive e interessa un'area di circa 58x42 km².

La geometria del sistema sopra descritta è l'elemento sulla cui base è stata costruita la mesh di calcolo del modello geomeccanico ad elementi finiti per la valutazione della subsidenza. In particolare risulta necessario avere una mesh tale da:

- rappresentare adeguatamente la distribuzione di pressione all'interno di ogni livello permeabile in cui l'estrazione di gas è simulata con Eclipse;
- onorare la distribuzione delle zone mineralizzate come descritte dai contatti gas-acqua;
- estendere la zona modellata dal punto di vista geomeccanico in una certa misura al di là del perimetro del modello fluido-dinamico, perché le condizioni al contorno non influenzino i risultati delle simulazioni.

I criteri di cui sopra hanno guidato la realizzazione della mesh 2D rappresentata in Figura 2 e Figura 3.



Figura 2 – Pianta della griglia di calcolo FEM utilizzata nel modello per i campi di Agosta e Dosso degli Angeli. Ogni elemento rappresentato ha in pianta otto nodi, di cui uno ad ogni vertice ed uno a metà di ogni lato, per cui la discretizzazione effettiva è più fitta di quanto visibile in figura.



Figura 3 – Zoom della visione in pianta della mesh di calcolo, focalizzata sulla zona centrale che rappresenta i campi di Dosso degli Angeli e Agosta.

La mesh 3D è stata quindi generata a partire dalla mesh 2D proiettata verticalmente a generare i livelli del giacimento, overburden ed underburden. Tutti questi livelli sono stati creati a partire dalle



stesse mappe di top e botton dei vari livelli estratte direttamente dai due modelli Eclipse che rappresentano Dosso degli Angeli ed Agosta. La mesh 3D, illustrata in Figura 4, si compone di una fittissima discretizzazione ad elementi finiti del sottosuolo con base corrispondente al top dei carbonati presenti nella zona, che costituiscono una superficie compresa tra 4000 e oltre 7500 m di profondità. La mesh ad elementi finiti ha 1653219 nodi ovvero 4959657 gradi di libertà totali di cui 4917010 effettivamente liberi (32647 gradi di libertà sono fissati dalle condizioni al contorno), e 514448 elementi a 16 o 20 nodi distribuiti su un totale di 74 strati – tra produttivi, strati di separazione, overburden ed underburden. La copertura (overburden) è discretizzata in 16 strati, mentre la base del modello (underburden) è composta di 4 strati.



Figura 4 – Mesh di calcolo ad elementi finiti utilizzata nel modello ISAMGEO per il complesso dei campi di Dosso degli Angeli ed Agosta. La scala verticale della rappresentazione è pari a 10 volte quella orizzontale. Gli elementi dei livelli più sottili sono a 16 nodi, ovvero sono ad interpolazione lineare in direzione verticale e quadratica nelle direzioni orizzontali. Gli altri elementi sono a 20 nodi, ovvero quadratici in ogni direzione. Di conseguenza, la discretizzazione effettiva è più fitta di quanto visibile in figura.

2.3 Proprietà dei materiali

2.3.1 Stress verticale

L'andamento dello sforzo totale verticale in funzione della profondità è stato calcolato, al di sopra dei 2500 m, attraverso una relazione specificatamente definita per il campo di Agosta:

$$\sigma_{v}(z_{tvdss}) = [0.0844 + 0.0163 \ln(z_{tvdss})] \times z_{tvdss}$$

ove z_{tvdss} è la profondità (in metri) riferita al livello medio del mare σ_v è lo stress totale verticale espresso in bar.

Al di sotto dei 2500 m l'andamento dello sforzo totale verticale in funzione della profondità è stato determinato a partire dalla ricostruzione di un profilo di densità bulk media (Figura 5) calcolato

considerando i valori di densità misurati negli intervalli coperti da density log e sonic log dei pozzi Dosso degli Angeli 21dir e Dosso degli Angeli 22dir.



Figura 5 – Profilo medio di densità per il campo di Dosso degli Angeli.

Questo profilo discreto di densità è stato integrato numericamente per ottenere un profilo discreto di sforzo totale verticale. Quest'ultimo è stato poi ricondotto ad una funzione che descrive la relazione tra sforzo totale verticale e profondità:

$$\sigma_{v}(z_{tvdss}) = 4.634 \cdot 10^{-13} z^{4}_{tvdss} - 4.114 \cdot 10^{-9} z^{3}_{tvdss} + 1.749 \cdot 10^{-5} z^{2}_{tvdss} + 0.1903 z_{tvdss}$$

dove σ_v è lo sforzo totale verticale (in bar), z_{tvdss} è la profondità (in metri) riferita al livello medio del mare.

2.3.2 Compressibilità uniassiale

Il parametro geomeccanico chiave nelle simulazioni di subsidenza è la compressibilità uniassiale c_m del materiale. E' oggi comunemente accettato [4] che i valori più attendibili di questo parametro, generalmente funzione non lineare dello stress efficace, siano quelli ottenuti dalle misure in situ tramite markers. Questo è particolarmente vero per sedimenti profondi, quali quelli considerati nel presente studio.

In assenza di dati specifici da marker sul campo di Dosso degli Angeli e di Agosta si è utilizzata per la stima della compressibilità una correlazione regionale basata sul più ampio dataset possibile e relativa alle stesse formazioni del Nord Adriatico. La relazione tra c_m e tensione verticale efficace σ'_{ν} impiegata è quella proposta da *Hueckel et al.* [6] e riportata in Figura 6, dove sono riportate la miglior stima: $c_m = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434}$

ed il quantile al 97.5%. Nella precedente relazione σ'_v è la tensione efficace verticale espressa in bar e c_m è il coefficiente di compressibilità edometrica espresso in bar⁻¹. Sempre in Figura 6 essa è messa a confronto con quella di Baù *et al.* [4]: si può osservare come le due appaiano simili. La tensione verticale efficace è stata calcolata tramite:

 $\sigma'_v = \sigma_v - p$

en

dove σ_v è la tensione verticale totale e *p* la pressione dei pori. Quest'ultima è stata estratta dallo studio fluido-dinamico alla profondità di riferimento, mentre la tensione verticale totale σ_v è stata calcolata come descritto nel §2.3.1.



Figura 6 – Correlazione tra compressibilità uniassiale c_m e stress efficace *in situ*, derivata da misure su marker nei campi a gas del bacino nord adriatico (da [6]).

Si segnala che studi successivi [7] hanno evidenziato come sia la correlazione di Baù *et al.* [4] sia quella di Hueckel *et al.* [6] tendano 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.* [7] hanno proposto che, in via cautelativa, il valore di *cm* ottenuto dalle precedenti correlazioni sia moltiplicato per 2:

$$c_m = \begin{cases} 2 \cdot 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z < 1500m \\ 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z \ge 1500m \end{cases}$$

La relazione sopra descritta è stata utilizzata per costruire lo scenario di riferimento nel presente studio: questa risulta infatti appropriata per la regione di Dosso degli Angeli, per cui esistono dati di livellazione, InSAR e CGPS che, come descritto nel §4, grazie ad essa vengono adeguatamente riprodotti. E' importante sottolineare che solo la parte più superficiale del campo di Agosta è posta a profondità inferiori ai 1500 m mentre il campo di Dosso degli Angeli si sviluppa a profondità superiori a 2800 m.

In accordo con le stime regionali di compressibiltà in funzione dello stress verticale efficace, sono stati anche definiti i limiti superiore ed inferiore da utilizzare nell'analisi parametrica relativa al solo campo di Agosta, in quanto in fase puramente previsionale. In particolare, per la regione al di sopra dei 2000 m di profondità sono stati definiti due ulteriori scenari di compressibilità : il quantile superiore o "*upper scenario*"; il quantile inferiore o "*lower scenario*":

 $c_m^{upper} = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \cdot 10^{0.467}$

 $c_m^{lower} = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \cdot 10^{-0.467}$

I campi di pressione del modello Eclipse sono stati stimati utilizzando compressibilità dei pori coerenti con il modello geomeccanico.

In Tabella 1 sono riportati i valori di profondità media, tensione verticale totale σ_{ν} , pressione dei pori iniziale *p*, tensione verticale efficace σ'_{ν} , coefficiente di Poisson *v*, compressibilità uniassiale c_m , adottati livello per livello nei differenti scenari analizzati.

Strato	ISAMGEO material	z media [m]	σ _v [bar]	p [bar]	σ' ν [bar]	<i>v</i> -	с _m " lower" [bar ⁻¹]	с _m " med" [bar ⁻¹]	с _т " upper" [bar ⁻¹]
Overburden	1	20.8	2.8	2.3	0.5	0.25	1.67E-03	1.67E-03	1.67E-03
Overburden	2	143.3	23.7	15.9	7.8	0.25	4.28E-04	2.51E-03	3.67E-03
Overburden	3	306.5	54.5	34.0	20.5	0.25	1.39E-04	8.14E-04	1.19E-03
Overburden	4	469.8	86.8	52.1	34.6	0.25	7.53E-05	4.41E-04	6.46E-04
Overburden	5	633.1	120.0	70.3	49.7	0.25	4.94E-05	2.89E-04	4.24E-04
Overburden	6	796.4	153.9	88.4	65.5	0.25	3.58E-05	2.10E-04	3.08E-04
Overburden	7	1000.4	197.1	111.0	86.0	0.25	2.61E-05	1.53E-04	2.24E-04
Overburden	8	1204.5	240.9	133.7	107.2	0.25	2.02E-05	1.18E-04	1.73E-04
Overburden	9	1418.6	287.6	157.5	130.1	0.25	1.61E-05	9.44E-05	1.38E-04
Overburden	10	1186.2	237.0	131.7	105.3	0.25	2.06E-05	1.21E-04	1.77E-04
Overburden	11	1545.6	315.4	171.6	143.9	0.25	1.43E-05	4.20E-05	1.23E-04
Overburden	12	1292.6	260.0	143.5	116.6	0.25	1.83E-05	1.07E-04	1.57E-04
Overburden	13	1630.2	334.1	181.0	153.2	0.25	1.33E-05	3.90E-05	1.14E-04
Overburden	14	1363.5	275.5	151.4	124.2	0.25	1.70E-05	9.97E-05	1.46E-04
Overburden	15	1323.8	266.8	146.9	119.9	0.25	1.77E-05	1.04E-04	1.52E-04
Overburden	16	1637.6	335.8	181.8	154.0	0.25	1.32E-05	3.88E-05	1.14E-04
Agosta	17	1344.2	271.3	149.2	122.1	0.25	1.74E-05	1.02E-04	1.49E-04
Agosta	18	1639.9	336.3	182.0	154.3	0.25	1.32E-05	3.87E-05	1.14E-04
Agosta	19	1356.5	274.0	150.6	123.4	0.25	1.71E-05	1.00E-04	1.47E-04
Agosta	20	1642.7	336.9	182.3	154.6	0.25	1.32E-05	3.86E-05	1.13E-04
Agosta	21	1371.2	277.2	152.2	125.0	0.25	1.69E-05	9.89E-05	1.45E-04

Tabella 1 – Proprietà assegnate, regione per regione, nei diversi scenari analizzati.



A 1						1			
Agosta	22	1646.1	337.6	182.7	154.9	0.25	1.31E-05	3.85E-05	1.13E-04
Agosta	23	1443.1	292.9	160.2	132.7	0.25	1.57E-05	9.22E-05	1.35E-04
Agosta	24	1681.7	345.5	186.7	158.9	0.25	1.28E-05	3.74E-05	1.10E-04
Agosta	25	1515.6	308.8	168.2	140.6	0.25	1.47E-05	4.31E-05	1.26E-04
Agosta	26	1721.5	354.4	191.1	163.3	0.25	1.24E-05	3.62E-05	1.06E-04
Agosta	31	1591.8	325.6	176.7	148.9	0.25	1.38E-05	4.03E-05	1.18E-04
Agosta	32	1755.2	361.9	194.8	167.0	0.25	1.20E-05	3.53E-05	1.03E-04
Agosta	33	1614.4	330.6	179.2	151.4	0.25	1.35E-05	3.96E-05	1.16E-04
Agosta	34	1764.2	363.9	195.8	168.0	0.25	1.20E-05	3.50E-05	1.03E-04
Agosta	35	1646.4	337.7	182.7	155.0	0.25	1.31E-05	3.85E-05	1.13E-04
Agosta	36	1777.0	366.7	197.2	169.5	0.25	1.18E-05	3.47E-05	1.02E-04
Agosta	37	1675.6	344.2	186.0	158.2	0.25	1.28E-05	3.76E-05	1.10E-04
Agosta	38	1788.6	369.3	198.5	170.8	0.25	1.17E-05	3.44E-05	1.01E-04
Agosta	39	1676.9	344.5	186.1	158.3	0.25	1.28E-05	3.76E-05	1.10E-04
Agosta	40	1789.2	369.4	198.6	170.8	0.25	1.17E-05	3.44E-05	1.01E-04
Agosta	41	1679.5	345.1	186.4	158.6	0.25	1.28E-05	3.75E-05	1.10E-04
Agosta	42	1791.4	369.9	198.9	171.1	0.25	1.17E-05	3.43E-05	1.01E-04
Agosta	43	1682.2	345.7	186.7	158.9	0.25	1.28E-05	3.74E-05	1.10E-04
Agosta	44	1794.0	370.5	199.1	171.4	0.25	1.17E-05	3.43E-05	1.00E-04
Agosta	45	1684.4	346.1	187.0	159.2	0.25	1.27E-05	3.73E-05	1.09E-04
Agosta	46	1796.2	371.0	199.4	171.6	0.25	1.17E-05	3.42E-05	1.00E-04
Agosta	47	1692.8	348.0	187.9	160.1	0.25	1.27E-05	3.71E-05	1.09E-04
Agosta	48	1804.4	372.8	200.3	172.5	0.25	1.16E-05	3.40E-05	9.96E-05
Agosta	49	1699.8	349.5	188.7	160.9	0.25	1.26E-05	3.69E-05	1.08E-04
Agosta	50	1811.2	374.3	201.0	173.3	0.25	1.15E-05	3.38E-05	9.91E-05
Agosta	51	1734.1	357.2	192.5	164.7	0.25	1.22E-05	3.59E-05	1.05E-04
Agosta	52	1847.5	382.4	205.1	177.4	0.25	1.12E-05	3.29E-05	9.65E-05
Agosta	53	1767.3	364.6	196.2	168.4	0.25	1.19E-05	3.50E-05	1.03E-04
Agosta	54	1882.6	390.3	209.0	181.3	0.25	1.09E-05	3.21E-05	9.40E-05
Agosta	55	1834.6	379.6	203.6	175.9	0.25	1.13E-05	3.32E-05	9.74E-05
Agosta	56	1953.7	406.2	216.9	189.3	0.25	1.04E-05	3.05E-05	8.94E-05
Agosta	57	1843.5	381.6	204.6	176.9	0.25	1.13E-05	3.30E-05	9.67E-05
Agosta	58	1962.7	408.2	217.9	190.4	0.25	1.03E-05	3.03E-05	8.88E-05
Agosta	59	1855.4	384.2	206.0	178.3	0.25	1.12E-05	3.27E-05	9.59E-05
Agosta	60	1974.4	410.8	219.2	191.7	0.25	1.03E-05	3.01E-05	8.81E-05
Agosta	61	1861.5	385.6	206.6	178.9	0.25	1.11E-05	3.26E-05	9.55E-05
Agosta	62	1980.1	412.1	219.8	192.3	0.25	1.02E-05	2.99E-05	8.78E-05
Agosta	63	1865.9	386.6	207.1	179.4	0.25	1.11E-05	3.25E-05	9.52E-05
Agosta	64	1984.3	413.1	220.3	192.8	0.25	1.02E-05	2.99E-05	8.75E-05
Agosta	65	1872.1	387.9	207.8	180.1	0.25	1.10E-05	3.23E-05	9.47E-05
Agosta	66	1989.9	414.3	220.9	193.4	0.25	1.02E-05	2.97E-05	8.72E-05
Agosta	67	1896.1	393.3	210.5	182.8	0.25	1.08E-05	3.18E-05	9.31E-05
Agosta	68	2012.0	419.3	223.3	196.0	0.25	1.00E-05	2.93E-05	8.59E-05
Agosta	69	1919.1	398.4	213.0	185.4	0.25	1.07E-05	3.13E-05	9.16E-05
Agosta	70	2033.2	424.0	225.7	198.4	0.25	9.86E-06	2.89E-05	8.47E-05
Agosta	71	1932.0	401.3	214.4	186.9	0.25	1.06E-05	3.10E-05	9.08E-05
Agosta	72	2045.0	426.7	227.0	199.7	0.25	9.78E-06	2.87E-05	8.40E-05
Agosta	73	1950.3	405.4	216.5	189.0	0.25	1.04E-05	3.06E-05	8.96E-05
Agosta	74	2061.7	430.5	228.8	201.6	0.25	9.67E-06	2.83E-05	8.31E-05
Agosta	75	1959.1	407.4	217.5	190.0	0.25	1.04E-05	3.04E-05	8.91E-05
Agosta	76	2069.8	432.3	229.7	202.5	0.25	9.62E-06	2.82E-05	8.27E-05
Zona transizione	77	2059.4	429.9	228.6	201.3	0.25	2.84E-05	2.84E-05	2.84E-05
Zona transizione	78	2157.6	452.1	239.5	212.6	0.25	2.67E-05	2.67E-05	2.67E-05



Zona transizione	79	2256.4	474.4	250.5	224.0	0.25	2.51E-05	2.51E-05	2.51E-05
Zona transizione	80	2330.1	491.2	258.6	232.5	0.25	2.40E-05	2.40E-05	2.40E-05
Zona transizione	81	2453.4	519.2	272.3	246.9	0.25	2.24E-05	2.24E-05	2.24E-05
Zona transizione	82	2502.7	539.5	272.8	266.7	0.25	2.05E-05	2.05E-05	2.05E-05
Zona transizione	83	2650.4	573.5	292.3	281.2	0.25	1.92E-05	1.92E-05	1.92E-05
Zona transizione	84	2675.3	579.3	295.6	283.7	0.25	1.91E-05	1.90E-05	1.91E-05
Zona transizione	85	2847.5	619.2	318.3	300.8	0.25	1 78E-05	1 78E-05	1 78E-05
Zona transizione	86	2847.9	619.3	318.4	300.9	0.25	1.78E-05	1.78E-05	1.78E-05
	97	2056.5	6// 6	332.7	311.0	0.25	1.70E 05	1.70E 05	1.70E 05
Dosso	07	2015 /	635.0	327.3	307.7	0.25	1.71E-05	1.71E-05	1.71E-05
Dosso	00	2015.4	658.5	340.6	317.0	0.25	1.73E-05	1.73E-05	1.73E-05
Dosso	09	2075.6	640.1	225.2	212.9	0.25	1.60E.05	1.60E.05	1.60 - 05
Dosso	90	2975.0	672.2	240.0	224.4	0.25	1.09E-05	1.69E-05	1.692-05
Dosso	91	3070.4	662.6	340.0	324.4	0.25	1.03E-03	1.03E-05	1.65E-05
Dosso	92	3037.5	003.0	343.4	320.1	0.25	1.66E-05	1.65E-05	1.66E-05
Dosso	93	3102.0	678.7	351.9	326.8	0.25	1.62E-05	1.62E-05	1.62E-05
Dosso	94	3060.4	668.9	346.4	322.5	0.25	1.64E-05	1.64E-05	1.64E-05
Dosso	95	3115.0	681.8	353.6	328.1	0.25	1.61E-05	1.61E-05	1.61E-05
Dosso	96	3073.3	672.0	348.1	323.8	0.25	1.63E-05	1.63E-05	1.63E-05
Dosso	97	3127.0	684.6	355.2	329.4	0.25	1.60E-05	1.60E-05	1.60E-05
Dosso	98	3085.6	674.8	349.7	325.1	0.25	1.63E-05	1.63E-05	1.63E-05
Dosso	99	3148.8	689.7	358.1	331.6	0.25	1.59E-05	1.59E-05	1.59E-05
Dosso	100	3107.2	679.9	352.6	327.3	0.25	1.61E-05	1.61E-05	1.61E-05
Dosso	101	3176.5	696.3	361.8	334.5	0.25	1.57E-05	1.57E-05	1.57E-05
Dosso	102	3134.3	686.3	356.2	330.1	0.25	1.60E-05	1.60E-05	1.60E-05
Dosso	103	3202.7	702.5	365.2	337.3	0.25	1.56E-05	1.56E-05	1.56E-05
Dosso	104	3159.7	692.3	359.5	332.8	0.25	1.58E-05	1.58E-05	1.58E-05
Dosso	105	3221.5	706.9	367.7	339.2	0.25	1.55E-05	1.55E-05	1.55E-05
Dosso	106	3178.1	696.7	362.0	334.7	0.25	1.57E-05	1.57E-05	1.57E-05
Dosso	107	3240.3	711.4	370.2	341.2	0.25	1.54E-05	1.54E-05	1.54E-05
Dosso	108	3196.5	701.0	364.4	336.6	0.25	1.56E-05	1.56E-05	1.56E-05
Dosso	109	3256.2	715.2	372.3	342.9	0.25	1.53E-05	1.53E-05	1.53E-05
Dosso	110	3212.3	704.7	366.5	338.3	0.25	1.55E-05	1.55E-05	1.55E-05
Dosso	111	3271.0	718.7	374.2	344.4	0.25	1.52E-05	1.52E-05	1.52E-05
Dosso	112	3227.1	708.2	368.4	339.8	0.25	1.54E-05	1.54E-05	1.54E-05
Dosso	113	3287.6	722.6	376.4	346.2	0.25	1.51E-05	1.51E-05	1.51E-05
Dosso	114	3243.6	712.2	370.6	341.6	0.25	1.53E-05	1.53E-05	1.53E-05
Dosso	115	3304.2	726.6	378.6	348.0	0.25	1.50E-05	1.50E-05	1.50E-05
Dosso	116	3260.1	716.1	372.8	343.3	0.25	1.53E-05	1.53E-05	1.53E-05
Dosso	117	3413.7	752.7	429.4	323.3	0.25	1.64E-05	1.64E-05	1.64E-05
Dosso	118	3370.7	742.4	387.4	355.0	0.25	1.47E-05	1.47E-05	1.47E-05
Dosso	119	3522.7	778.9	456.5	322.5	0.25	1.64E-05	1.64E-05	1.64E-05
Dosso	120	3480.9	768.9	446.1	322.8	0.25	1.64E-05	1.64E-05	1.64E-05
Dosso	121	3535.9	782.1	459.7	322.4	0.25	1.64E-05	1.64E-05	1.64E-05
Dosso	122	3493.8	772.0	449.3	322.7	0.25	1.64E-05	1.64E-05	1.64E-05
Dosso	123	3545.0	784.3	462.0	322.3	0.25	1.64E-05	1.64E-05	1.64E-05
Dosso	124	3503.0	774.2	451.6	322.6	0.25	1.64E-05	1.64E-05	1.64E-05
Dosso	125	3681.4	817.5	495.9	321.5	0.25	1.65E-05	1.65E-05	1.65E-05
Dosso	126	3632.7	805.6	483.8	321.8	0.25	1.65E-05	1.64E-05	1.65E-05
Dosso	127	3822.2	852.1	530.9	321.1	0.25	1.65E-05	1.65E-05	1.65E-05
Dosso	128	3767.3	838.5	517.3	321.2	0.25	1.65E-05	1.65E-05	1.65E-05
Underhurden	120	3882.5	867.0	545.9	321.1	0.25	1.65E-05	1.65E-05	1.65E-05
Underburden	120	4088.1	918.6	597.0	321.6	0.25	1.65E-05	1.65E-05	1.65E-05
Underburden	121	4362.2	989.2	665.2	324.1	0.25	1.63E-05	1.63E-05	1.63E-05
	101	1.002.2	000.2	000.2		0.20			



Underburden	132	4841.8	1119.1	784.4	334.7	0.25	1.57E-05	1.57E-05	1.57E-05
-------------	-----	--------	--------	-------	-------	------	----------	----------	----------

2.4 Inizializzazione

2.4.1 Stato tensionale iniziale

Per il campo oggetto dello studio lo sforzo totale verticale è stato calcolato dal gradiente di overburden descritto nel paragrafo 2.3.1. Lo sforzo orizzontale è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico definite come:

$\sigma_h' = K_0 \cdot \sigma_v'$

dove K₀ rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.54 [8].

2.5 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello di flusso Eclipse, è stata importata nel modello ad elementi finiti.

3 Risultati delle simulazioni

Nel presente paragrafo vengono riportati i risultati delle simulazioni eseguite al fine di stimare l'entità della subsidenza attesa dalla coltivazione dei campi di Agosta e di Dosso degli Angeli. Si ricorda che la simulazione è stata protratta a pozzi chiusi per circa 30 anni dopo la chiusura dei campi per analizzare l'impatto della depressurizzazione degli acquiferi idraulicamente connessi alla zona mineralizzata.

Si osservi come le variazioni di compressibilità degli strati superficiali abbiano un effetto molto modesto sul comportamento nella regione di Dosso degli Angeli (si vedano grafici a seguire) quindi è ragionevole ritenere che l'history match, effettuato di fatto sui soli dati relativi alla produzione di Dosso degli Angeli, non vincoli la compressibilità dei livelli superiori (di fatto quelli al di sopra dei 2500 m di profondità), che riguardano invece Agosta, e quindi sia ragionevole nella fase di forecast aprire il ventaglio delle possibilità come normalmente fatto in fase totalmente previsionale.

Per ricapitolare, si riportano nella seguente tabella (Tabella 2) i valori di subsidenza previsti nella posizione di massima subsidenza sopra il giacimento di Dosso degli Angeli (coordinate 1756433.1 m EST, 4943059.4 m NORD) e in corrispondenza delle stazioni CGPS per i due campi.

Dete	Max Dosso	CDC David		GPS Agosta	
Data	Data		Cm Med	Cm Up	Cm Low
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
01/01/1980	17	16	0	0	0
01/01/1990	30	28	0	0	0
01/01/2000	36	34	1	1	1
01/01/2010	37	35	2	2	2
01/01/2015	38	35	2	2	2
01/06/2017	38	36	2	2	2
01/06/2020	38	36	5	8	3
01/06/2027	38	36	9	17	5
01/06/2030	38	36	10	17	5
01/06/2040	38	36	10	17	6
01/06/2050	37	35	11	17	6
01/06/2060	36	34	11	17	6

Tabella 2 – Evoluzione temporale della subsidenza totale (in cm) in corrispondenza del punto di massima subsidenza per il campo di Dosso degli Angeli e delle stazioni GPS.

Da Figura 7 a Figura 18 a sono riportate le mappe di subsidenza prevista sul complesso dei campi Dosso degli Angeli – Agosta fino al giugno 2060. Si osservi come il massimo di subsidenza permane al di sopra di Dosso, con valori pressocchè stazionari e già raggiunti alla data odierna, mentre ovviamente si osserva una evoluzione della subsidenza in corrispondenza al campo di Agosta.



Figura 7 – Curve di iso-subsidenza (in m), al giugno 2017, corrispondente alla data di apertura del campo di Agosta. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità media per la regione di Agosta.



Figura 8 – Curve di iso-subsidenza (in m), al giugno 2020, corrispondente a 3 anni dalla data di apertura del campo di Agosta. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità media per la regione di Agosta.



Figura 9 – Curve di iso-subsidenza (in m), al 2030, corrispondente alla data di chiusura del campo di Agosta. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità media per la regione di Agosta.



Figura 10 – Curve di iso-subsidenza (in m), al 2060, corrispondente alla data di fine della simulazione. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità media per la regione di Agosta.



Figura 11 – Curve di iso-subsidenza (in m), al giugno 2017, corrispondente alla data di apertura del campo di Agosta. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità Upper per la regione di Agosta.



Figura 12 – Curve di iso-subsidenza (in m), al giugno 2020, corrispondente a 3 anni dalla data di apertura del campo di Agosta. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità Upper per la regione di Agosta.



Figura 13 – Curve di iso-subsidenza (in m), al 2030, corrispondente alla data di chiusura del campo di Agosta. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità Upper per la regione di Agosta.



Figura 14 – Curve di iso-subsidenza (in m), al 2060, corrispondente alla data di fine della simulazione. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità Upper per la regione di Agosta.



Figura 15 – Curve di iso-subsidenza (in m), al giugno 2017, corrispondente alla data di apertura del campo di Agosta. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità Lower per la regione di Agosta.



Figura 16 – Curve di iso-subsidenza (in m), al giugno 2020, corrispondente a 3 anni dalla data di apertura del campo di Agosta. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità Lower per la regione di Agosta.



Figura 17 – Curve di iso-subsidenza (in m), al 2030, corrispondente alla data di chiusura del campo di Agosta. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità Lower per la regione di Agosta.



Figura 18 – Curve di iso-subsidenza (in m), al 2060, corrispondente alla data fine simulazione. I risultati corrispondono allo scenario di compressibilità Lower per la regione di Agosta.

4 Confronto con i dati disponibili

I risultati delle simulazioni sono stati confrontati con i dati misurati disponibili per l'area oggetto di studio. Tale confronto è stato effettuato solamente con riferimento allo scenario Cm Med. A tal proposito è importante sottolineare come le compressibilità della regione di Agosta abbia un impatto minimo sui risultati delle simulazioni nella regione di Dosso degli Angeli. Si ricorda che fino al 2015 è stato in produzione solo il campo di Dosso degli Angeli, quindi tutta la subsidenza calcolata è da attribuirsi esclusivamente a questo campo.

Sono stati in particolare esaminati sette punti notevoli la cui posizione è mostrata in Figura 19. Si tratta della posizione del GPS a Smarlacca, ove sono anche stati elaborati dati InSAR in banda X (quindi ad alta risoluzione), quattro punti notevoli ricavati dagli stessi dati InSAR e posizionati strategicamente nell'area di interesse, oltre che due punti della rete di livellazione, posti in prossimità del giacimento di Dosso degli Angeli. Si osservi che i dati GPS di Smarlacca sono disponibili dal 2002 ad oggi, mentre i dati InSAR in banda X sono disponibili solo dal 2012. I dati di livellazione invece coprono il periodo 2002 - 2011, in quanto sono stati utilizzati solo i dati certificati dall'Università di Bologna e quindi considerati pienamente affidabili.



Figura 19 – Posizione dei punti di controllo.

Il confronto tra dato misurato e dato calcolato richiede, ovviamente, che il primo sia depurato delle componenti di subsidenza non attribuibili all'estrazione di gas, in questo caso la sola estrazione dal campo di Dosso degli Angeli. Esiste una certa incertezza concernente il valore della subsidenza non attribuibile al gas, che si compone a sua volta di una parte superficiale che coinvolge la

compattazione ed ossidazione dei sedimenti superficiali (ricchi in materia organica) e l'eventuale componente di estrazione d'acqua, ed una componente di movimento tettonico profondo. La prima può essere stimata, almeno localmente, da misure assestimetriche quali quelle disponibili in località Smarlacca. Per la seconda esistono solo stime generali e aventi ampia incertezza. In questo studio si è assunto che la componente di subsidenza media non attribuibile al gas sia, per l'intera area in esame, pari a 5 mm/anno, valore scelto sulla base di recenti analisi integrate delle varie misure storiche disponibili (si vedano [9] e [10]). Queste analisi suggeriscono per l'intera area considerata in questo studio un valore medio di subsidenza non dovuta all'estrazione di gas attorno a 5 mm/anno, ed indicano inoltre l'esistenza di una elevata variabilità locale dovuta alle caratteristiche dei sedimenti superficiali. Il valore di 5 mm/anno è stato quindi sottratto ai dati misurati (livellazioni, GPS ed InSAR), e la parte residua, attribuibile quindi al gas, è illustrata nelle Figure riportate qui di seguito. In Figura 20 è mostrato il confronto tra previsione del modello e sia i dati GPS in località Smarlacca che le livellazioni a due caposaldi, depurati dalle componenti non-gas. In Figura 21 sono mostrati gli andamenti misurati e depurati ricavati da InSAR nei cinque punti di controllo, e confrontati con le previsioni del modello. Il confronto mostra un buon accordo tra le misurazioni disponibili e i risultati del modello.



Figura 20 – Confronto tra subsidenza misurata, depurata delle componenti non gas stimate a 5 mm/anno, ed il risultato della simulazione in corrispondenza della stazione GPS di Smarlacca e di due caposaldi di livellazione (3380RA e 4830RA).

eni



Figura 21 – Confronto tra dati InSAR relativi ai cinque punti di controllo, depurati delle componenti non gas stimate a 5 mm/anno, e risultato della simulazione negli stessi punti (linea nera).

en

5 Effetti della produzione del giacimento di Agosta

Al fine di analizzare gli effetti della produzione di Agosta sulla regione oggetto dello studio, agli spostamenti calcolati in superficie dalla simulazione integrata sono stati sottratti quelli di una simulazione equivalente in cui è stato mantenuto attivo solo il giacimento dei Dosso degli Angeli.

In Tabella 3 si riportano i risultati di tale analisi in corrispondenza della stazione CGPS di Agosta.

Tabella 3 – Evoluzione temporale della subsidenza in corrispondenza della stazione CGPS del campo di Agosta depurata dagli effetti di Dosso degli Angeli.

Doto		GPS Agosta						
Data	Cm Med	Cm Up	Cm Low					
	(cm)	(cm)	(cm)					
01/06/2017	0	0	0					
01/06/2020	3	6	1					
01/01/2030	7	15	2					
01/06/2060	7	14	3					

Da Figura 22 a Figura 30 si riportano le mappe con i risultati di tale analisi.



Figura 22 – Effetti (in m) della produzione di Agosta sulla subsidenza prevista a giugno 2020, scenario Cm Medio.

eni



Figura 23 – Effetti (in m) della produzione di Agosta sulla subsidenza prevista a gennaio 2030, scenario Cm Medio.



Figura 24 – Effetti (in m) della produzione di Agosta sulla subsidenza prevista a giugno 2060, scenario Cm Medio.



Figura 25 – Effetti (in m) della produzione di Agosta sulla subsidenza prevista a giugno 2020, scenario Cm Upper.



Figura 26 – Effetti (in m) della produzione di Agosta sulla subsidenza prevista a gennaio 2030, scenario Cm Upper.



Figura 27 – Effetti (in m) della produzione di Agosta sulla subsidenza prevista a giugno 2060, scenario Cm Upper.



Easting Gauss Boaga Fuso Ovest (m)

Figura 28 – Effetti (in m) della produzione di Agosta sulla subsidenza prevista a giugno 2020, scenario Cm Lower.

eni



Figura 29 – Effetti (in m) della produzione di Agosta sulla subsidenza prevista a gennaio 2030, scenario Cm Lower.



Figura 30 – Effetti (in m) della produzione di Agosta sulla subsidenza prevista a giugno 2060, scenario Cm Lower.



Bibliografia

- 1. EclipseTM, Schlumberger, versione 2012.2.
- 2. M. Ferronato, G. Gambolati, C. Janna, P. Teatini Modello si subsidenza antropica prodotta dalla coltivazione del giacimento di Dosso degli Angeli. 06/2012.
- 3. G. Gambolati, P. teatini, M. Ferronato: *Linee guida per lo studio dei fenomeni di subsidenza nell'ambito di progetti di sviluppo sostenibile di campi ad olio e gas* 01/2007.
- 4. D. Bau', 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.
- 5. Campi a gas di Dosso degli Angeli e Agosta Modello predittivo di subsidenza Isamgeo Engineering GmbH 25 maggio 2015.
- 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. M. Ferronato, G. Gambolati, P. Teatini and D. Baù: *Iterpretation of Radioactive Marker Measurements To Evaluate Compaction in the Northern Adriatic Gas Field*, SPE Evaluation & Engineering, December 2003.
- 8. F.J.Santarelli, M.Brignoli, A. Pellegrino: La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala 04/1996.
- 9. Teatini P., M. Ferronato, G. Gambolati, W. Bertoni and M. Gonnella, 2005: A century of land subsidence in Ravenna, Italy. Environmental Geology, 47, 831-846.
- Simeoni, U., V. Brunelli, C. Corbau, A. Pellegrinelli, P. Polo, P. Teatini, U. Tessari, 2007: *Analisi dell'impatto della subsidenza attesa dalla coltivazione del giacimento di Agosta sulle infrastrutture idrauliche e stradali*. Rapporto tecnico JOB 292103 – SPC. 00-BG-E-94049, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara.



Rev.

0

Progetto di sviluppo del giacimento di idrocarburi denominato

"Agosta" tramite la messa in produzione del pozzo "Agosta 1 dir"

PIANO DI MONITARAGGIO DEI FENOMENI GEODINAMICI

				M.C.DoyGM	
		GEOD/CS		M.C. DACOME	
0		GEOD		ANOSEPHI	June 2015
REV.	DESCRIPTION	PREPARED BY	CHECKED BY	APPROVED BY	DATE

I



Indice

PREMESSA 3
PIANO DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA PER LO SVILUPPO DEL CAMPO "AGOSTA"
 2.1 Descrizione in dettaglio del piano di monitoraggio
2.1.3 Livellazione geometrica di alta precisione
2.1.5 Rilievo satellitare GPS in continuo (CGPS)
Unit - EPSU
b. Piezometro23 2.1.7 Rilievo batimetrico23
2.1.8 Monitoraggio della pressione e della produzione - misure di pressione statica25
ULTERIORI MONITORAGGI26



1. Premessa

Il piano di monitoraggio geodinamico previsto nell'ambito della messa in produzione, e trattamento del gas estratto, del giacimento di Agosta, in comune di Comacchio (FE) (**Fig. 1**) nell'ambito della conferenda concessione di coltivazione idrocarburi denominata "Agosta", si propone di misurare ed analizzare ogni possibile impatto, diretto od indiretto, del progetto di coltivazione sulle aree circostanti e soprattutto sull'adiacente area lagunare delle valli di Comacchio ad est e sud-est.

Contestualmente lo studio si propone di dimostrare l'affidabilità e la correttezza sia dei modelli utilizzati sia delle previsioni di subsidenza eseguite, che escludono possibili impatti non previsti sulla aree sopra, mediante l'applicazione delle migliori metodologie e tecnologie allo stato dell'arte ad oggi disponibili in ambito internazionale.

Le metodologie di monitoraggio proposte per il piano in oggetto riflettono il know-how acquisito da Eni, dall'industria e dal mondo accademico in campo internazionale, relativamente alle tematiche di subsidenza.

In particolare gli sviluppi tecnologici avvenuti a partire dalla seconda metà degli anni '90 sino ad oggi, e già impiegati da Eni, consentono di osservare quasi in tempo reale e misurare con la precisione richiesta i fenomeni geodinamici (deformazioni, abbassamenti/innalzamenti) che interessano la superficie del suolo.

Eni, nella redazione del piano di monitoraggio, preventivamente proposto, ha altresì seguito gli indirizzi riportati nel documento del gennaio 2007 "Linee guida per lo studio dei fenomeni di subsidenza nell'ambito di progetti di sviluppo sostenibile di campi ad olio o gas", redatto dal Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate (DMMMSA) dell'Università di Padova.



Figura 1: area interessata dalle attività del progetto "Agosta 1 dir"



Sheet

4

2. Piano di monitoraggio della subsidenza per lo sviluppo del campo "Agosta"

Eni utilizza per il monitoraggio della subsidenza le tecniche più avanzate, impiegando in modo integrato tutti gli strumenti offerti dalle moderne tecnologie, aggiornate continuamente allo stato dell'arte.

Le informazioni ottenute dal monitoraggio rispondono a un duplice obiettivo:

- accertare con continuità e tempestivamente se i fenomeni di subsidenza si evolvono secondo la previsione iniziale. Ciò al fine di predisporre, in caso di necessità e per tempo, interventi di mitigazione del fenomeno stesso e/o di protezione dell'ambiente;
- fornire dati per la periodica revisione e taratura dei modelli matematici utilizzati per previsione della subsidenza.

La valutazione di subsidenza attesa è stata effettuata tramite l'applicazione del modello poro-elasto-plastico ad elementi finiti proprietario di Isamgeo Engineering GmbH. Lo studio geomeccanico è stato effettuato considerando anche gli effetti del vicino campo di Dosso degli Angeli, che si estende nell'area orientale delle valli di Comacchio, a cavallo tra le due province di Ferrara e Ravenna(fig.2).



Figura 2: ubicazione giacimenti di Agosta e Dosso degli Angeli.

Lo studio si è basato sui risultati dei modelli statici e fluido-dinamici dei due giacimenti, che sono stati realizzati da Eni S.p.A. con il codice di calcolo Eclipse 3D. Tali studi hanno fornito le informazioni relative alla geometria dei due giacimenti, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni. Data la separazione delle strutture che ospitano i giacimenti di Agosta e Dosso degli Angeli, è stata esclusa la comunicazione idraulica tra i due giacimenti ed è perciò stato possibile eseguire due studi dinamici separati.

eni S.p.A. Upestream a eni services	nd Technical	Date June 2015	Doc. N°. GEOD_1506_d18	Rev. 0	Sheet 5	Of 26
---	--------------	-------------------	---------------------------	-----------	------------	----------

Al fine di analizzare gli effetti della produzione del solo pozzo di Agosta sulla regione oggetto dello studio, agli spostamenti calcolati in superficie dalla simulazione integrata ("Agosta+Dosso") sono stati sottratti quelli di una simulazione equivalente in cui è stato mantenuto attivo solo il giacimento di Dosso degli Angeli ("(Agosta+Dosso)-Dosso").

In tab.1 si riportano i risultati di tale analisi misurati sul modello in corrispondenza della stazione CGPS di Agosta, la cui ubicazione è illustrata in fig.4.

Tabella 1 – Evoluzione temporale della subsidenza in corrispondenza della stazione CGPS del campo di Agosta depurata dagli effetti di Dosso degli Angeli.

Data	GPS Agosta	GPS Agosta					
Dala	Cm Med	Cm Up	Cm Low				
	(cm)	(cm)	(cm)				
01/06/2017	0	0	0				
01/06/2020	3	6	1				
01/01/2030	7	15	2				
01/01/2040	8	14	2				
01/01/2050	7	14	3				
01/06/2060	7	14	3				

Il cono di subsidenza (linea di isosubsidenza di -2 cm) risulta estendersi di circa 14,5 km in direzione NO-SE e di circa 4,2 km in direzione NE-SO (**Fig. 5**).



Figura 3: ubicazione del campo di Agosta

eni	eni S.p.A. Upestream and Technical services	Date June 2015	Doc. N°. GEOD_1506_d18	Rev. 0	Sheet 6	Of 26
-----	---	-------------------	---------------------------	-----------	------------	----------



Figura 4: ubicazione GPS presso area pozzo Agosta 1



Figura 5: cono di subsidenza (-2cm) previsto al 2030 dopo l'inizio della produzione. Scenario Cm medio.

In tale situazione un programma di monitoraggio in grado di rispondere agli obiettivi sopra riportati può essere basato su una serie di misure e rilievi, alcuni acquisiti con continuità altri periodicamente.

Tali misure e rilievi saranno ovviamente integrati con tutte le informazioni sul comportamento produttivo del giacimento (es. pressioni statiche, portate di gas ed acqua, ecc.) che Eni come operatore acquisisce di routine sui campi a gas operati, per la loro gestione ottimale.

Eni, al fine del controllo dei fenomeni geodinamici durante la coltivazione del giacimento di Agosta, propone l'implementazione del piano che viene di seguito descritto e nel dettaglio esaminato all'interno del presente documento.

Saranno descritti tipi di monitoraggio e relativa frequenza di acquisizione, al fine di un controllo adeguato dell'entità della subsidenza, sopra prevista,

Jun J	
eni	

7

Of

26

- 1. L'inserimento del campo nella rete Eni di controllo altimetrico tramite le seguenti metodologie di rilevamento:
 - > misure di livellazione geometrica di alta precisione, con una periodicità del rilievo di 3 anni.
 - rilievo satellitare GPS in continuo (CGPS);
 - > rilievi satellitari SAR in banda X, con frequenza annuale di acquisizione delle indagini
- 2. Esecuzione di rilievi batimetrici dell'area lagunare di Comacchio secondo le seguenti modalità:
 - un rilievo iniziale per registrare il "bianco", prima dell'avvio della produzione del campo, sull'area che sarà oggetto di disturbo di subsidenza così come definita dal modello previsionale. Il rilievo batimetrico sarà acquisito su tutta la superficie della laguna in cui la profondità dell'acqua ne permetta una corretta registrazione in base alle migliori tecnologie attualmente disponibili sul mercato

Successivamente, nel caso sia possibile l'acquisizione della batimetria (profondità e condizioni dell'acqua idonee), si valuterà, in base ai valori di subsidenza registrati in continuo dal CGPS, la necessità di eseguire altri rilievi batimetrici prima della fine della vita produttiva del campo:

- > un rilievo non prima di 5 anni dall'inizio della produzione, salvo diverse indicazioni provenienti dal monitoraggio CGPS;
- > eventuali rilievi successivi in base alle indicazioni provenienti dai monitoraggi.
- 3. Misura della compattazione superficiale tramite l'installazione di una stazione assestimetrico-piezometrica (stazione EPSU - Extensometric Piezometric Survey Unit)
- 4. Acquisizione di profili statici di pressione in pozzo. L'acquisizione di profili statici di pressione in pozzo avverrà con frequenza annuale per i primi due anni di vita produttiva del campo. Successivamente, si valuterà, in base ai risultati ottenuti dal modello previsionale di subsidenza, di diminuire la frequenza di acquisizione dei profili statici a biennale o triennale.

In accordo con quanto previsto dalle "Linee Guida" del DMMMSA dell'Università di Padova, sarà effettuato un follow up del piano di monitoraggio proposto durante la vita produttiva del giacimento, cosicché il programma originario possa essere calibrato e adattato man mano che nuove informazioni verranno raccolte durante lo sviluppo del campo.



Rev.

0

2.1 <u>Descrizione in dettaglio del piano di monitoraggio</u>

2.1.1 <u>Area d'indagine</u>

L'indagine riguarderà l'area del poligono costituito dalle seguenti linee di livellazione: 33 (Eni), 86, 87, 135, 102, 103, 90, 89, e 73 (rete regionale di controllo della subsidenza) (fig 7).

2.1.2 <u>Rete Eni di monitoraggio per il controllo altimetrico del</u> territorio

Ormai da tempo Eni utilizza, per il monitoraggio della subsidenza in tutte le aree ove sviluppa i giacimenti avuti in concessione, ogni tecnica più avanzata e universalmente riconosciuta come la più efficace per lo studio del fenomeno.

In tale contesto, il campo di Agosta sarà inserito nella rete di controllo altimetrico esistente, che ne costituirà il punto "zero" precedente l'inizio della coltivazione del giacimento stesso.

Attualmente, la rete Eni di monitoraggio prevede diverse metodologie di rilevamento, di seguito illustrate.

2.1.3 Livellazioni geometriche di alta precisione

Una rete di livellazione geometrica complessa di alta precisione, copre, per l'area centro-nord, la dorsale Adriatica da Treviso a Pescara **(Fig. 6)**, comprese le diramazioni del delta del Po, per un totale di circa 1400 km.

Si tratta del metodo tradizionale e normalmente più usato per controllare le variazioni altimetriche del territorio, in standard di alta precisione dal 2003, i cui dati periodicamente rilevati vengono controllati e certificati da qualificati Enti di certificazione esterni alla Società.

La rete di livellazione è stata rilevata recentemente nel 2014 e sono pertanto disponibili dati storici per la definizione della cosiddetta campagna zero, sviluppata prima dell'avvio della produzione del pozzo. I dati di livellazione rilevati periodicamente, sono sottoposti al controllo e alla validazione da parte di un ente accademico esterno, autonomo e indipendente. Attualmente, il controllo e la certificazione dei dati è stato affidato all'Università di Bologna, dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei materiali – DICAM.

La metodologia utilizzata da Eni, tramite i suoi contrattisti, nell'esecuzione del lavoro di livellazione al fine di raggiungere gli obiettivi di precisione e affidabilità dei dati rilevati, viene dettagliata nelle "Specifiche Tecniche per l'Esecuzione di Misure di Livellazione" (Documento interno AESI-2011015-T-SPT-01).

eni S.p.A. Upestream and Technical services	Date June 2015	Doc. N°. GEOD_1506_d18	Rev. 0	Sheet 9	Of 26
---	-------------------	---------------------------	-----------	------------	----------

Il rilevamento delle variazioni altimetriche, mediante livellazione geometrica dal mezzo eseguita in alta precisione consente, con la metodologia adottata, di determinare variazioni con un livello di precisione teorica molto elevato (decimo di millimetro). Questo fatto, tuttavia, non rappresenta la precisione assoluta delle misure, che normalmente viene influenzata da notevoli condizionamenti esterni non sistematici, fino a raggiungere, per effetto della propagazione dell'errore di misura, un valore di quota con un range di precisione di ± 1 cm e talvolta di superare tale valore. Le campagne di misura mediante livellazione effettuate da Eni, sono soggette alla supervisione e controllo sia in corso d'opera sia in fase di elaborazione dei dati, dell'Ente certificatore, attualmente costituito dal dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei materiali – DICAM dell'Università degli Studi di Bologna.



Figura 6: rete di livellazione Eni

eni S.p.A. Date Doc. N°. Rev. Sheet Upestream and Technical services Date Doc. N°. GEOD_1506_d18 0 Sheet	Of 26
--	----------

La verifica documentale nella zona di Agosta, per quanto riguarda la livellazione geometrica di alta precisione, ha evidenziato la presenza di alcune linee appartenenti alla rete di livellazione Eni "Dorsale Adriatica" (in **Fig.7** rappresentate in colore rosso), sia ad Ovest dell'area del pozzo Agosta 1 dir (linea 22), sia ad est dello stesso (linee 24 e 19), che sono inserite nel programma periodico di rilevamento condotto da Eni. Nella stessa zona sono presenti 12 capisaldi (vedi area in blu in **Fig. 7**), che fino ad ora sono stati rilevati saltuariamente. Risultano, inoltre, presenti alcune linee appartenenti alla rete Eni (linee 6, 33, 25, e 42, rappresentate in colore rosso in **Fig. 7**) e alcune linee appartenenti alla rete ARPA (linee 72, 73, 86, 87, 88 e 89, rappresentate in colore verde in **Fig. 7**,) nell'area ad Ovest del pozzo che parzialmente ricalcano il percorso delle citate linee Eni e che, dal punto di vista della distribuzione geometrica, offrono buone soluzioni per la realizzazione di anelli chiusi di compensazione.

Nella zona ad Est del pozzo sono infine presenti anche le linee della rete ARPA (**Fig. 7** in in colore verde) 90, 103, 102, 135 e 136, che parzialmente ricalcano i percorsi delle linee Eni 19 e 24. Gli anelli di compensazione possono essere sviluppati sia rispetto alle linee della rete Eni, sia rispetto alle linee della rete ARPA, sia infine utilizzando i dati di entrambe le reti. La rete di livellazione può, ragionevolmente, essere estesa fino alla distanza in linea d'aria di circa 20 km dal pozzo, per uno sviluppo lineare pari a oltre 180 km. Lo schema proposto è stato sottoposto alla valutazione dell'ente certificatore (DICAM) che ha ritenuto la proposta corretta rispetto agli obiettivi.

Con un sopralluogo è stata verificata la possibilità di eseguire le misure laddove i capisaldi siano presenti e la possibilità di monumentare nuovi laddove non risultassero più presenti, oppure capisaldi risultassero danneggiati. La cartografia (Fig. 7), indica con tratteggio di colore giallo (T1, T2 e T4) i nuovi percorsi che saranno realizzati per sopperire alle interruzioni dei percorsi originali, evidenziate durante il sopralluogo, nonché il nuovo percorso T3, che sarà realizzato per creare un ulteriore anello di compensazione e il percorso T5 che sarà realizzato in funzione della possibilità di materializzare nuovi capisaldi. Sarà inoltre garantito il collegamento dei capisaldi afferenti il campo di Agosta con la linea di livellazione Eni/ARPA posta immediatamente ad Est dello stesso.

Durante la fase di campagna, sulla base anche delle indicazioni del DICAM, sarà inoltre verificata la possibilità di materializzare un nuovo tratto di livellazione (T5) per creare un collegamento tra i capisaldi esistenti nel campo di Agosta (12 CS) e una delle linee della rete ARPA, con l'obiettivo di realizzare un ulteriore anello di compensazione, nell'ottica di perseguire il miglioramento della qualità delle misure e della loro precisione. Ovviamente, nel rispetto di quanto previsto dalle buone norme di realizzazione dei manufatti destinati alla monumentazione dei capisaldi, la realizzazione di questo nuovo tratto di livellazione, così come il ripristino di eventuali capisaldi danneggiati e/o distrutti, sarà vincolata alla verifica sulle condizioni di compatibilità rispetto alla affidabilità e precisione richiesta dalle specifiche tecniche che Eni adotta per

eni S.p.A. Upestream and Techi eni services	nical Date June 2015	Doc. N°. GEOD_1506_d18	Rev. 0	Sheet I I	Of 26
---	-------------------------	---------------------------	-----------	--------------	----------

effettuare le misure di livellazione. Sarà posta la massima attenzione alla conservazione dei capisaldi della rete ARPA, che saranno eventualmente sostituiti in caso di necessità, solo previo parere preventivo dell'ARPA stessa. Le misure saranno realizzate utilizzando la tecnica della livellazione geometrica dal mezzo in alta precisione, con tolleranza massima ammessa pari a $\pm 2\sqrt{1}$, come previsto dalle specifiche tecniche attualmente vigenti, che sono state redatte sulla base delle indicazioni del nostro Ente certificatore (DICAM) e recependo le indicazioni contenute nelle "Linee guida per lo studio dei fenomeni di subsidenza nell'ambito di progetti di sviluppo sostenibile di campi ad olio o gas" emesse dall'Università di Padova nel 2007.

<u>Con riferimento alle medesime linee guida, il rilievo sarà realizzato con periodicità triennale, prossimo rilievo previsto nell'area sarà nel 2017.</u>

eni	eni S.p.A. Upestream and Technical services	Date June 2015	Doc. N°. GEOD_1506_d18	Rev. 0	Sheet 12	Of 26
-----	---	-------------------	---------------------------	-----------	-------------	----------



Figura 7: linee di livellazione geometrica



2.1.4 **Rilievi satellitari SAR**

Un'altra tecnica che si è sviluppata nel corso degli ultimi 15 anni per il monitoraggio della subsidenza riguarda l'analisi interferometrica di dati radar da satellite. Questo metodo consente, oggi, la mappatura dello spostamento della superficie terrestre su aree estese con elevata precisione tramite lo studio dei movimenti di bersagli al suolo denominati "permanent scatterers" (PS).

Si tratta di rilievi effettuati tramite sistemi radar che elaborano immagini multitemporali con tecniche interferometriche e studio dei diffusori permanenti, rendendo possibile ricostruire l'evoluzione temporale della subsidenza anche per periodi passati e su aree estese con precisione millimetrica (circa 2 mm/anno).

Il Radar ad Apertura Sintetica (Synthetic Aperture Radar) è un sensore attivo, montato a bordo di satelliti, che emette radiazioni elettromagnetiche e registra la potenza del segnale riflesso della superficie calcolando anche il tempo intercorso fra l'emissione e il ritorno del segnale stesso.

Il rilievo SAR, viene usualmente condotto utilizzando i dati rilevati dai satelliti dell'agenzia Spaziale Canadese, RADARSAT 1 (missione conclusa nel marzo del 2013) e RADARSAT 2 (Fig. 8).

Una positiva verifica effettuata sulla distribuzione dei bersagli radar naturali rilevabili con il satellite Cosmo-Skymed (banda X) (fig 9), di più elevata risoluzione spaziale, rispetto ad i dati Radarsat in banda C, ha confermato la possibilità di utilizzo di questo tipo di dato senza la necessità di installare un numero significativo di bersagli radar artificiali sul territorio. Il dato in banda X sarà ad ogni modo integrato comunque, con l'acquisizione dei data set Radarsat sulla stessa area.





Figura 8: copertura immagini SAR

Per l'area di interesse (circa 1200 km²) saranno effettuate acquisizioni radar per aggiornare annualmente i dati già in possesso di Eni mediante un sensore in banda X (Cosmo Skymed o TerraSar-X).

Il sistema radar fornisce una misura realmente molto valida e precisa per lo studio di aree di vasta dimensione, ma solo in senso relativo, riferita cioè ad un'origine di movimento interna all'immagine radar stessa, che viene considerata stabile. Necessita perciò di dati puntiformi assoluti, ottenibili con metodi complementari quali livellazioni e CGPS (Continuous Global Positioning System), sui cui risultati viene tarato.

Per quanto riguarda la monumentazione di una stazione "Satellite Survey Unit" (SSU) si rimanda ai paragrafi successivi.

Il Piano di Monitoraggio per lo sviluppo del campo di Agosta prevede rilievi satellitari SAR con frequenza di acquisizione delle immagini annuale.





Figura 9: Permanent Scatterers visibili su immagini in banda X



0

Of

26

Il rilievo satellitare CGPS (Continous Global Positioning System) è attualmente l'unico sistema che consente di monitorare in continuo l'andamento planoaltimetrico nel tempo: è una delle tecniche maggiormente utilizzate da Eni che, fin dal 1998, ha avviato la fase di sperimentazione della metodologia e successivamente, nel corso degli anni, ha implementato la propria rete di stazioni di monitoraggio sia *onshore* che *offshore*.

La tecnica CGPS si basa sull'osservazione in continuo dei segnali di 24 satelliti NAVSTAR (<u>Navigation Satellite with Time and Ranging</u>) che ruotano attorno alla Terra ad altezze di oltre 20.000 km, con un periodo orbitale di circa 12 h, trasmettendo continuamente su due frequenze distinte, denominate L1 e L2, sulle quali sono modulate informazioni binarie contenenti tutti i parametri per la determinazione della loro orbita.

Tali informazioni consentono di determinare con elevata precisione le coordinate (posizione plano-altimetrica) di un punto sulla superficie terrestre e, di conseguenza, possono essere utilizzate per monitorare, tramite appropriati software scientifici (attualmente Bernese 5.0), con altrettanta precisione sub-centimetrica, anche i movimenti plano-altimetrici rispetto ad una rete di riferimento.

Per quanto riguarda il monitoraggio GPS in continuo (CGPS) per lo sviluppo del campo di Agosta, nella zona sono presenti 5 stazioni di monitoraggio in continuo (**Fig. 10**), attivate in epoche differenti secondo la seguente cronologia:

1.	Pomposa ¹	dal	luglio 2005
-			

- 2. Manara dal luglio 2005
- 3. Ravenna terra¹ dal luglio 2005
- 4. Smarlacca dal aprile 2002
- 5. Spinaroni dal aprile 2002

L'attuale rete di monitoraggio CGPS esistente, pur in presenza di serie storiche significative, rappresenta un elemento di criticità, per effetto della distanza dal pozzo Agosta 1 dir, poiché le stazioni più vicine (Manara e Smarlacca) si trovano, in linea d'area, ad una distanza di circa 15 km, mentre le altre si trovano a distanze più elevate, variabili dai 19 ai 26 km.

¹ La titolarità delle stazioni di Pomposa e Ravenna terra è passata dal 2010 a Gas Plus, dopo l'acquisizione da parte di quest'ultima dei titoli minerari posseduti da Padana Idrocarburi. Tuttavia i dati delle stazioni CGPS sono a nostra disposizione per l'utilizzo a scopo di monitoraggio, insistendo su aree in cui esiste il vincolo di monitoraggio per Eni anche per alcuni anni dopo il termine della produzione.





Figura 10: stazioni CGPS, SSU ed EPSU

Pertanto, dovendo disporre di una stazione di misura satellitare il più possibile vicino al pozzo, Eni ha già realizzato una postazione Satellite Survey Unit (SSU – **Fig. 11)** monumentata con stazione CGPS e corner reflectors SAR (posizione rappresentata in **Fig. 4**), che sarà anche periodicamente rilevata mediante collegamento con la rete di livellazione programmata. La stazione in oggetto è attiva da marzo 2015.

La postazione S.S.U. (Satellite Survey Unit), è una metodologia di monitoraggio sviluppata da Eni capace di generare un "valore aggiunto" della qualità dei segnali satellitari CGPS e SAR, in cui su una platea in cemento armato sono collocati antenna GPS (per monitoraggio in continuo), coni riflettenti (bersagli) per acquisizioni radar da satellite (SAR) e borchia per livellazione geometrica di

eni Up ser	i S.p.A. pestream and Technical rvices	Date June 2015	Doc. N°. GEOD_1506_d18	Rev. 0	Sheet 18	Of 26
------------------	--	-------------------	---------------------------	-----------	-------------	----------

precisione. La platea in cemento armato garantisce medesimi spostamenti verticali per tutte le metodologie di misura. Questo metodo permette di controllare, reciprocamente, ognuno dei sistemi di monitoraggio che, in modo del tutto indipendente, misurano lo stesso fenomeno con precisioni e ripetibilità diverse tra loro. La borchia di livellazione sulla piazzola SSU sarà poi rilevata contestualmente con le misurazioni topografiche descritte nel capitolo della livellazione.



Figura 11: Satellite Survey Unit – SSU

Come già detto la stazione SSU è stata ubicata nella posizione mostrata alla fig.4. In particolare questa installazione utilizza un modello di corner reflector di ultima generazione, in cui i due riflettori (corners), uno dedicato ad essere visibile dall'orbita ascendente e l'altro da quella discendente del satellite, sono collocati in unica installazione che permette una compattazione del sistema (fig. 12).



Figura 12: Agosta Satellite Survey Unit – SSU



Rev.

0

La postazione SSU dove è stata ubicata sarà in stretta connessione con la piazzola destinata all'installazione dell'assestimetro/piezometro, più avanti descritta.

I dati CGPS vengono controllati e certificati dal Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna.

E' opportuno precisare che l'analisi e l'interpretazione degli andamenti nel tempo delle misure altimetriche CGPS, da utilizzarsi per una verifica/taratura dei modelli previsionali di subsidenza, non possono essere considerate sufficientemente attendibili per dataset relativi a periodi di osservazione inferiori ai 36 mesi, come indicato dal Dip. di Fisica dell'Università di Bologna che è l'Ente che certifica tali dati con cadenza biennale.

L'Ente certificatore, infatti, verifica e valida i dati registrati al fine di poter disporre di un numero sufficiente di osservazioni per il corretto inquadramento delle componenti periodiche, della loro incidenza sulle misure e per poter filtrare il "rumore" che, per piccole velocità di subsidenza, è dello stesso ordine di grandezza del valore del fenomeno fisico misurato.

Serie storiche di durata inferiore ai 36 mesi possono, infatti, essere utilizzate solo per confrontare il trend degli andamenti temporali delle misure altimetriche con quello dei valori calcolati da modello previsionale, qualora si abbia una subsidenza caratterizzata da valori di sufficientemente elevati. In questi casi sarà possibile monitorare solo eventuali anomalie di trend ma non procedere ad un confronto diretto dei valori attesi da modello vs. i valori misurati.

In generale:

dataset < 12 mesi: solo follow up per monitoraggio dei dati acquisiti;

dataset di 12÷36 mesi e:

piccoli valori di subsidenza: analisi tendenziale del fenomeno e monitoraggio delle anomalie verso il trend previsionale;

grandi valori di subsidenza: analisi tendenziale del fenomeno per calibrazione del modello previsionale;

dataset > 36 mesi: analisi di trend e calibrazione dei modelli geomeccanici, confrontando il dato di velocità di subsidenza misurato (depurato dalla velocità di subsidenza naturale) e i valori dei modelli previsionali.

Le elaborazioni sono state effettuate con software scientifico Bernese 5.0, strategia OBS-MAX, utilizzando i prodotti finali (effemeridi precise e file del polo) messi a disposizione dall'IGS (International GNSS Service). Il sistema di riferimento ITRF2005 (realizzazione IGS05) è materializzato dalle stazioni appartenenti alla rete EUREF disponibili tra: Bucarest, Cagliari, Genova, Graz, Matera, Medicina, Padova, Penc, Sofia, Torino, Zimmervald. L'eliminazione degli outlier viene effettuata mediante test a 3 SIGMA iterativo.

Quanto sopra risulta dalle relazioni dell'Ente certificatore ed è in linea con quanto riportato a tal proposito sulle "Linee Guida" del DMMMSA " ... perché l'informazione finale assuma valore statistico significativo è necessario che i rilevamenti siano effettuati per un periodo non inferiore a 12 mesi".

Luxu	
eni	

0

Of

26

Per ottenere informazioni sulla percentuale di subsidenza ascrivibile alla compattazione superficiale e all'emungimento idrico, sarà realizzata una stazione EPSU (**Fig. 13**) tramite la quale, nell'ambito del monitoraggio geodinamico dell'area, saranno effettuate misure dirette della compattazione superficiale mediante l'uso di un assestimetro e misure delle variazioni della falda acquifera mediante piezometro.

La messa in posto di tale stazione consente di avere la misura diretta della compattazione superficiale del terreno, sia naturale che antropica. e quindi non attribuibile direttamente all'attività di estrazione di idrocarburi. La misura della compattazione superficiale è in questo ambito fondamentale in quanto evidenzia una percentuale assoluta della subsidenza totale misurata da ritenersi non imputabile all'azione di estrazione di idrocarburi, e quindi da sottrarre alla subsidenza totale per evidenziare il nostro eventuale contributo ad essa. La misura viene appunto effettuata attraverso l'installazione di un assestimetro verticale.

In questo senso saranno quindi previsti un assestimetro profondo (fino al limite inferiore degli acquiferi sfruttati) ed uno o più di piezometri di controllo.

La profondità dell' assestimetro che sarà installato sarà decisa a valle di un attento studio idrogeologico dell'area che fornirà la distribuzione verticale dei principali acquiferi sfruttati, così da identificare la porzione di terreno più direttamente compattabile.

Associato all'assestimetro sarà installato anche uno (o più piezometri), che misureranno direttamente le variazione delle principali falde acquifere il cui andamento è strettamente legato alle "pulsazioni" di compattazione del terreno e permetteranno una migliore interpretazione dei dati assestimetrici.

La piazzola di basamento sarà realizzata in stretta connessione con la postazione SSU, come detto nel paragrafo precedente avendo così la possibilità di confrontare la compattazione superficiale misurata dall'assestimetro con le variazioni altimetriche totali che si ottengono dal GPS e dalla interferometria radar.

	eni S.p.A.	Date	Doc. N°.	Rev.	Sheet	Of
	Upestream and Technical	June 2015	GEOD_1506_d18	0	21	26
eni	services	-				



Figura 13: stazione "Extensometric Piezometric Survey Unit" (EPSU)

In via preliminare e in attesa delle verifiche progettuali puntuali, è stata individuata la posizione possibile per la postazione EPSU vicina alla postazione SSU, mostrata in Fig. 14



Figura 14: schema area pozzo "Agosta 1 dir" con possibile ubicazione postazione EPSU

a. Assestimetro

Lo strumento è schematicamente composto da un ancoraggio di fondo opportunamente sagomato (vedi schema di principio, di seguito riportato, fig.15), da un'asta di misura in acciaio indeformabile, rigidamente collegata all'ancoraggio (cementato al fondo), e da una tubazione esterna avente la funzione di protezione dell'asta di misura. Lo strumento viene messo in posto inserendolo in un foro nel terreno appositamente predisposto. Il suo principio di funzionamento è il seguente: Ipotizzando il punto di ancoraggio dello

eni S.p.A. Upestream and Technical services	Date June 2015	Doc. N°. GEOD_1506_d18	Rev. 0	Sheet 22	Of 26
---	-------------------	---------------------------	-----------	-------------	----------

strumento fisso e non soggetto a movimenti di sorta, si può affermare che l'asta di misura (essendo rigida) riporta in superficie tale punto. L'asta non risente della compattazione degli strati superficiali del terreno in quanto risulta completamente svincolata dal terreno circostante per mezzo della tubazione esterna (camicia dell'assestimetro, parte integrante dello strumento) che fa contemporaneamente da casing e da protezione dell'astina di misurazione. Le misure consistono nel rilievo periodico a boccaforo della posizione relativa tra la testa dell'asta di misura e la superficie, da cui si può ricavare la variazione dello spessore di terreno tra il profilo superficiale e l'ancoraggio inferiore. L'assestimetro fornisce i cedimenti totali tra il punto più profondo del suo ancoraggio e la superficie. Chiaramente spostamenti che interessano strati più profondi (oltre la quota di ancoraggio) non vengono rilevati dalla strumentazione.



Figura 15: schema assestimetro verticale

In particolare :

- I'assestimetro misura, con precisione del millimetro, la compattazione che ha luogo tra la superficie del suolo e la profondità entro la quale sono compresi gli acquiferi, soggetti normalmente ad un intenso emungimento idrico. La misura è dunque quella di una frazione della compattazione di origine naturale (subsidenza naturale) ed eventualmente della compattazione di origine antropica;
- i dati dei rilievi assestimetrici sono correlati agli altri rilievi altimetrici ed in tal modo utilizzati nelle analisi geodetiche del territorio;
- Ia perforazione e la posa in opera della strumentazione assestimetrica sono realizzate con le migliori tecnologie attualmente disponibili ed in modo tale da non compromettere minimamente le falde acquifere attraversate.

eni S.p.A. Date Doc. N°. Rev. Sheet Upestream and Technical services June 2015 GEOD_1506_d18 0 23	DeteDoc. N°.Rev.SheetOfJune 2015GEOD_1506_d1802326
---	--

L'assestimetro fornisce indicazioni locali; per una visione corretta del fenomeno della subsidenza in un quadro regionale sarà necessario ubicare, in corrispondenza degli assestimetri, capisaldi di livellazione e/o sistemi di misurazione satellitare.

b. Piezometro

Un piezometro è generalmente costituito da un tubo che riveste un pozzo perforato fino al raggiungimento del livello acquifero (artesiano o freatico) di interesse. In corrispondenza dell'acquifero il tubo è finestrato in modo che il fluido raggiunga entro il tubo il proprio livello idrostatico o piezometrico. Una sonda immersa nel fluido rileva nel tempo le variazioni della quota del pelo libero della falda indotte da cause naturali (regime di ricarica) o antropiche (emungimenti idrici), come mostra lo schema sotto riportato (fig.16).



Figura 16: schema piezometro

Analogamente a quanto previsto per l'assestimetro, anche per la perforazione e la posa in opera della postazione piezometrica è previsto l'impiego delle migliori tecnologie attualmente disponibili. In particolare sarà messo in opera quanto necessario per impedire qualunque comunicazione fra le eventuali varie falde acquifere attraversate.

I dati piezometrici saranno correlati a quelli della compattazione superficiale e ai dati ottenuti dai sistemi di monitoraggio che il presente piano prevede siano installati.

2.1.7 <u>Rilievo batimetrico</u>

Il sistema di monitoraggio CGPS fornisce informazioni di elevata precisione che, però, sono di natura "puntuale", ovvero riferite esclusivamente al luogo in cui è installato il ricevitore.

Per tale ragione, soprattutto in zone in cui il cono dell'eventuale disturbo di subsidenza si estende in aree ricoperte dall'acqua (offshore marino o

Of

26

lacustre), è opportuno integrare le misure fornite dal CGPS con rilievi batimetrici in grado di ricostruire con elevato dettaglio l'andamento morfologico del fondo del bacino attraverso tecniche DSM (*Digital Surface Model*).

Eni ha acquisito un'ottima esperienza nell'esecuzione di rilievi batimetrici per le aree circostanti i campi a gas *offshore* dell'Adriatico, ottenendo valori restituiti di profondità del fondo mare con una precisione di ± 5 cm.

L'esecuzione del rilievo batimetrico, nella porzione di laguna immediatamente ad est del pozzo di AGOSTA, è prevista sull'area oggetto di disturbo di subsidenza, come definita dal modello.

La sua acquisizione resta però subordinata ad un approfondito studio di fattibilità che ne garantisca l'efficacia e soprattutto la sua ripetibilità nel tempo. Il sito infatti presenta delle caratteristiche geomorfologiche (tipiche delle aree lagunari con acque sottili) che potrebbero pregiudicare la fattibilità e l'attendibilità del rilievo. Le informazioni preliminari raccolte rappresentano una situazione che mostra alcune criticità dovute alla possibilità di misurare correttamente la posizione del fondale, infatti l'interfaccia acqua sedimento e' generalmente preceduta dalla presenza di un substrato misto acqua/sedimento (con spessore variabile lateralmente e nel tempo) non completamente competente prima di arrivare all'effettivo fondo solido, una tale situazione non da garanzie di acquisire informazioni batimetriche avvierà quindi una serie di azioni di verifica tecnica attendibili. ENI preliminare, effettuando anche studi di fattibilità predittivi con le proprie contrattiste, utilizzando le migliori tecnologie attualmente disponibili, volte a validare il miglior metodo di acquisizione e di elaborazione dei dati, con lo scopo di inserire anche il rilievo batimetrico tra le metodologie del piano di monitoraggio del pozzo di AGOSTA.

Nel caso in cui i risultati confermassero la validità della metodologia implementata e fosse garantita la ripetibilità delle misure, verrà acquisito un rilievo iniziale per registrare il "bianco", prima dell'avvio della produzione del campo, sull'area che sarà oggetto di disturbo di subsidenza così come definita dal modello previsionale (fig. 17). Il rilievo batimetrico sarà acquisito su tutta la superficie della laguna in cui la profondità dell'acqua ne permetta una corretta registrazione in base alle migliori tecnologie attualmente disponibili sul mercato. Il rilievo batimetrico delle medesime aree verrà ripetuto, sulla base della subsidenza attesa, dopo un periodo di tempo di circa 5÷10 anni e successivamente con frequenze opportunamente calibrate.

Il periodo esatto verrà definito in base ai valori di subsidenza registrati e ottenuti in continuo dai CGPS e dagli altri sistemi di monitoraggio. Se tali dati mostreranno che il fenomeno della subsidenza evolve secondo la previsione iniziale, si potrà procedere come indicato al punto precedente; se, al contrario, le misure evidenzieranno un'evoluzione più veloce o più lenta del fenomeno, si potrà anticipare o, viceversa, ritardare il secondo rilievo in relazione ai valori di subsidenza "reali" registrati.

Nell'eventualità che le misure reali della subsidenza e le revisioni periodiche indichino un andamento del fenomeno diverso da quello previsto, si potranno

June 2013 GEOD_1306_018 0 23	eni	Upestream and Technical services	Date June 2015	Doc. N°. GEOD_1506_d18	Rev. 0	Sheet 25	Of 26
------------------------------	-----	----------------------------------	-------------------	---------------------------	-----------	-------------	----------

eseguire rilievi successivi con cadenze da stabilire sempre sulla base delle indicazioni di velocità di subsidenza ottenute dai monitoraggi.



Figura 17 : subsidenza prevista al 2060, l'area in trasparenza individua la possibile estensione del rilievo batimetrico.

2.1.8 <u>Monitoraggio della pressione e della produzione - misure</u> <u>di pressione statica</u>

Eni esegue sistematicamente il monitoraggio della pressione di giacimento tramite l'acquisizione di profili statici che, per ciascun campo, permette di verificare il modello previsionale.

Il profilo di pressione fornisce indicazione sui gradienti dei fluidi presenti in pozzo provenienti dai livelli eroganti e consente di calcolare la pressione statica della formazione stessa, permettendo di calibrare/validare il modello di giacimento 3D, quindi quello previsionale di subsidenza.

L'importanza dei profili statici in pozzo per la misura delle pressioni dei fluidi di strato durante la fase produttiva, al fine di confermare i modelli predittivi di subsidenza, viene sottolineata dal documento del gennaio 2007 "Linee guida per lo studio dei fenomeni di subsidenza nell'ambito di progetti di sviluppo sostenibile di campi ad olio o gas" prodotto dal Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate (DMMMSA) dell'Università di Padova: ".. La variazione di pressione indotta nelle formazioni profonde dall'estrazione di idrocarburi è un parametro di fondamentale importanza al fine di valutare la sostenibilità ambientale dello sfruttamento della risorsa naturale: in primis, consente la calibrazione del modello matematico/numerico di produzione che fornisce la forzante ai modelli di previsione della subsidenza... L'andamento temporale della pressione statica nelle formazioni produttive dovrebbe pertanto essere monitorato in modo sistematico,".

Secondo quanto previsto da Eni nel programma di monitoraggio del giacimento di Agosta, l'acquisizione di profili statici di pressione in pozzo avverrà con

	eni S.p.A.	Date	Doc. N°.	Rev.	Sheet	Of
	Upestream and Technical	June 2015	GEOD_1506_d18	0	26	26
eni	services	-				

frequenza annuale per i primi due anni di vita produttiva del campo. Successivamente, si valuterà, in base ai risultati ottenuti dal modello previsionale di subsidenza, di diminuire la frequenza di acquisizione dei profili statici a biennale o triennale.

3. Ulteriori monitoraggi

Poiché l'area interessata è una zona di valle a forte vocazione agricola, si ritiene opportuno, oltre ai dati che verranno raccolti tramite l'esecuzione dei pozzi assestimetrici/piezometrici, eseguire uno studio stratigrafico di dettaglio dei primi metri di sottosuolo attraverso una campagna di sondaggi.

L'acquisizione di dati stratigrafici, insieme al monitoraggio profondo (profili statici in pozzo, assestimetri e piezometri) e superficiale (livellazioni, CGPS e SAR), permetterà di valutare la velocità di subsidenza totale superficiale e di tutte le singole componenti naturali e/o antropiche, ivi compresi gli eventuali effetti locali dovuti all'ossidazione di torbe, se presenti.

4. Revisione e taratura periodica

I rilievi batimetrici, le misure dei CGPS installati e le misure di pressione in pozzo saranno, inoltre, utilizzati, ad integrazione dei dati sul comportamento produttivo del campo, per la revisione e la taratura periodica dei modelli matematici utilizzati per le previsioni di subsidenza.