

	Sede Operativa di Crema GIAC
---	---------------------------------

CONCESSIONE MINERBIO STOCCAGGIO

PROGETTO MINERBIO P> Pi

MANAGEMENT SUMMARY

			E. Cairo		
0	<i>Emissione</i>		A. Mantegazzi	D. Marzorati	Luglio 2012
REV.	DESCRIZIONE		PREPARATO	APPROVATO	DATA

SOMMARIO

- 1 - FINALITA' DEL PROGETTO**
- 2 - DESCRIZIONE DEL GIACIMENTO**
- 3 - RILIEVO SISMICO 3D**
- 4 - POZZO MINERBIO 85 DIR**
- 5 - PROVE DI FRATTURAZIONE IN SITU**
- 6 - ANALISI GEOMECCANICHE SU CAROTE**
- 7 - STUDIO PETROFISICO**
- 8 - MODELLIZZAZIONE STATICA E DINAMICA 3D**
- 9 - MODELLIZZAZIONE GEOMECCANICA**
- 10 - TENUTA MECCANICA DEI POZZI**
- 11 - ASSESSMENT DEGLI IMPIANTI DI SUPERFICIE**
- 12 - PROGRAMMA DI MONITORAGGIO**
- 13 - RISULTATI DEL MONITORAGGIO NELLA FASE DI SPERIMENTAZIONE**
- 14 - EVENTI SISMICI E TENUTA DEL GIACIMENTO**

1 - FINALITÀ DEL PROGETTO

L'esercizio dei giacimenti di stoccaggio in condizioni di sovrappressione, prassi già consolidata a livello internazionale, è ritenuta una soluzione tecnica conveniente ed efficace per conseguire un'ottimizzazione della gestione operativa, attraverso il miglioramento delle prestazioni iniettive ed erogative.

Nell'ambito di un piano di potenziamento complessivo dell'attività di stoccaggio il giacimento di Minerbio "Pool C" è stato individuato fra quelli potenzialmente idonei per la realizzazione di un progetto di superamento della pressione originaria di giacimento ($P > P_i$).

Per valutare la fattibilità operativa del progetto è stata realizzata una serie di studi e di interventi operativi, finalizzati in particolare alla raccolta dei dati per una accurata descrizione delle principali caratteristiche del giacimento: acquisizione di un rilievo sismico 3D per la caratterizzazione complessiva (geometria, assetto strutturale), perforazione di un pozzo geognostico dedicato (prelievo di carote di fondo, log geofisici, misure geomeccaniche in situ), studi per la caratterizzazione petrofisica e geomeccanica della formazione argillosa di copertura, valutazione dell'integrità dei pozzi e delle facilities di superficie.

Le informazioni acquisite sono state opportunamente integrate attraverso uno studio di modellizzazione dinamica 3D, al fine di valutare correttamente l'idoneità tecnica del giacimento per gli obiettivi prefissati.

I risultati degli studi condotti, ed in particolare lo studio geologico-strutturale dettagliato del campo, le analisi delle carote per la caratterizzazione della formazione argillosa di copertura e lo studio di modellizzazione geomeccanica del giacimento assicurano la possibilità tecnica di raggiungere nel giacimento di Minerbio, in condizioni di totale sicurezza, un incremento di pressione statica di giacimento (datum a 1334 m l.m.) fino al 107% della pressione di scoperta, cioè da $153,4 \text{ kg/cm}^2_a$ (150,4 barsa) a $164,1 \text{ kg/cm}^2_a$ (161 barsa).

Gli accertamenti volti a verificare l'idoneità degli impianti di superficie (facilities di centrale e condotte di adduzione del gas) alle prestazioni richieste hanno infatti evidenziato la possibilità di esercire l'attività di stoccaggio in sovrappressione pari al 107% P_i , mantenendo invariati gli attuali asset, fino a valori di pressione pari a 150 kg/cm^2 (147 barg).

I pozzi 32, 34, 35, 42, 43, 44 e 45 del cluster E/E1 saranno eserciti a $P > P_i$ a seguito sostituzione condotte.

La presenza nel cluster C1 di apparecchiature progettate ad una pressione di 144 barg (separatori) ha imposto la rimozione e sostituzione con altre idonee alle nuove condizioni operative; l'installazione dei nuovi apparecchi è già stata conclusa e la loro pressione di bollo è di 165 barg a testa-pozzo. In tutti gli altri clusters le apparecchiature installate hanno pressione di progetto di 150 kg/cm² (147barg) e risultano pertanto idonee alla pressione di esercizio prevista.

Le simulazioni numeriche eseguite sulla base della modellizzazione dinamica 3D del giacimento evidenziano, per un esercizio con $P=107\% P_i$, una potenzialità del volume di Working Gas pari a circa 2.950 MSmc, con un incremento di 420 MSmc rispetto alla situazione a $P=P_i$.

A seguito di specifica autorizzazione ministeriale durante il ciclo di stoccaggio 2011-2012 è stata eseguita una prova di iniezione sperimentale mirata a verificare operativamente la fattibilità dell'esercizio in sovrappressione fino al $107\%P_i$.

Nel corso della fase di sperimentazione si è raggiunto un valore di pressione medio in giacimento a fine campagna di 158,4 barsa, corrispondente a circa il 105% della pressione originaria, a fronte di un volume iniettato in condizioni di sovrappressione di 356 MSmc. Non è stato possibile raggiungere il volume di progetto iniziale della sperimentazione, pari a 420 MSm³ al 107% della P_i , a seguito del mancato approvvigionamento del gas dai clienti; tuttavia i risultati del test realizzato consentono comunque di affermare la fattibilità dei volumi previsionali del progetto.

L'analisi dei monitoraggi eseguiti nella fase di iniezione sperimentale in sovrappressione indica che le operazioni di stoccaggio, durante il superamento della pressione iniziale fino al 107%, non hanno comportato criticità nella gestione del campo di Minerbio. Anche le analisi relative al monitoraggio microsismico di superficie e quelle riguardanti i movimenti superficiali del suolo non hanno riscontrato la presenza di situazioni anomale.

Il test ha pertanto verificato l'idoneità del giacimento all'esercizio in sovrappressione fino al $107\% P_i$.

A seguito di questa verifica di campo, Stogit richiede, con apposita istanza ai sensi del D.M. 4 febbraio 2011, l'autorizzazione all'ampliamento della capacità di stoccaggio del giacimento di Minerbio, realizzata mediante incremento della pressione di esercizio fino a valori massimi pari al 107% della pressione statica di fondo originaria pari a 161 barsa, cui corrispondono valori a testa-pozzo di 143,7 barsa. A tale incremento di pressione corrisponderebbe un incremento di volume pari a 420 MSmc.

2 - DESCRIZIONE DEL GIACIMENTO

Inquadramento regionale

Il giacimento di Minerbio, ubicato circa 20 km a nord-est di Bologna (fig. 1), è associato ad una anticlinale fortemente asimmetrica, allungata in direzione NW–SE, il cui fianco nord-est è interessato da un sistema di faglie che presentano un rigetto di circa 100 m. La chiusura mineraria della struttura è legata ad una trappola di tipo misto, in cui interagiscono elementi tettonici e fattori di natura stratigrafica (geometrie lenticolari dei livelli sabbiosi con progressiva chiusura stratigrafica).

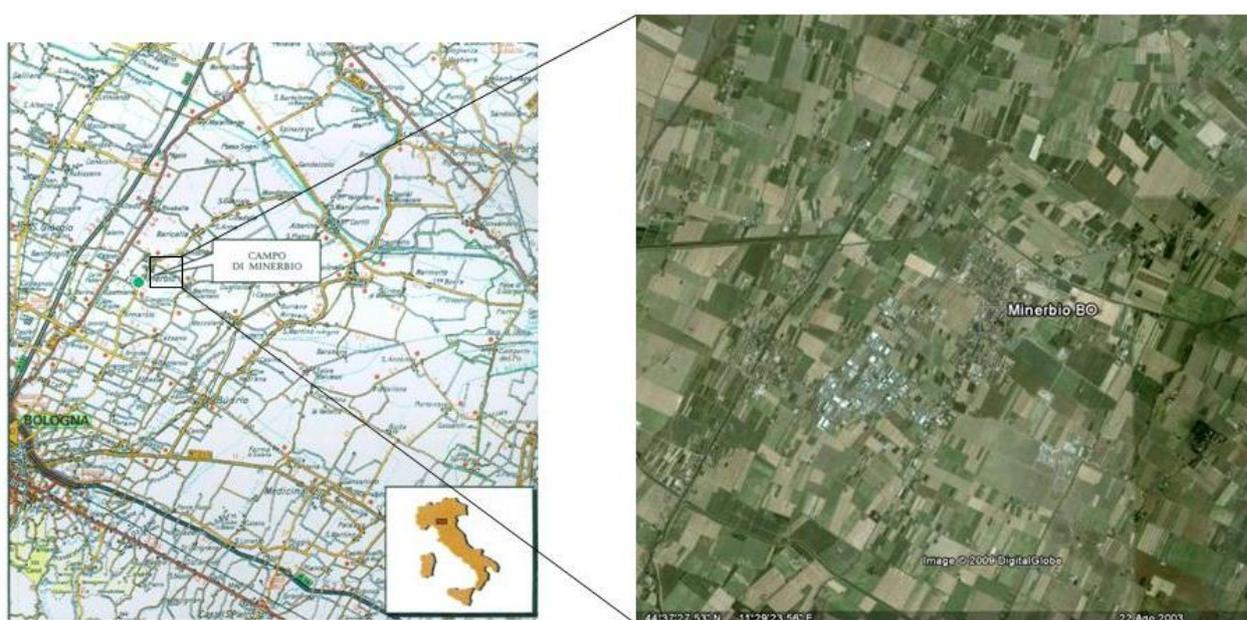


Fig. 1

Il reservoir principale è costituito da livelli sabbiosi con spessore di alcune decine di metri, appartenenti alla F.ne Porto Garibaldi, posti ad una profondità media di 1300 m l.m. L'estensione dell'area originariamente mineralizzata è di circa 8 km².

La successione stratigrafica dei pozzi del giacimento di Minerbio è costituita da sedimenti marini che documentano le ultime fasi del riempimento del bacino di avana fossa padano, ad opera di apporti provenienti dallo smantellamento delle adiacenti catene alpina ed appenninica. L'intervallo stratigrafico di interesse minerario, denominato Pool C ed attualmente adibito all'attività di stoccaggio, si è depositato durante il Pliocene, ed è rappresentato da una serie di livelli sabbiosi di natura torbiditica; ad essi si interpongono livelli argillosi di limitato spessore (fig. 2-3).

Successivamente la zona fu interessata dalla sedimentazione di depositi di natura argillosa che presentano spessori medi di circa 130 m e che raggiungono talora i 300 m. Questi sedimenti, che costituiscono la formazione di copertura del giacimento, presentano una notevole continuità laterale e verticale a livello regionale, e possiedono caratteristiche petrofisiche di impermeabilità tali da garantire l'isolamento idraulico rispetto ai livelli porosi di superficie.

La parte più recente della successione stratigrafica è infine costituita da litotipi prevalentemente sabbiosi che hanno portato all'estinzione della sedimentazione marina e alla formazione dell'attuale pianura alluvionale.

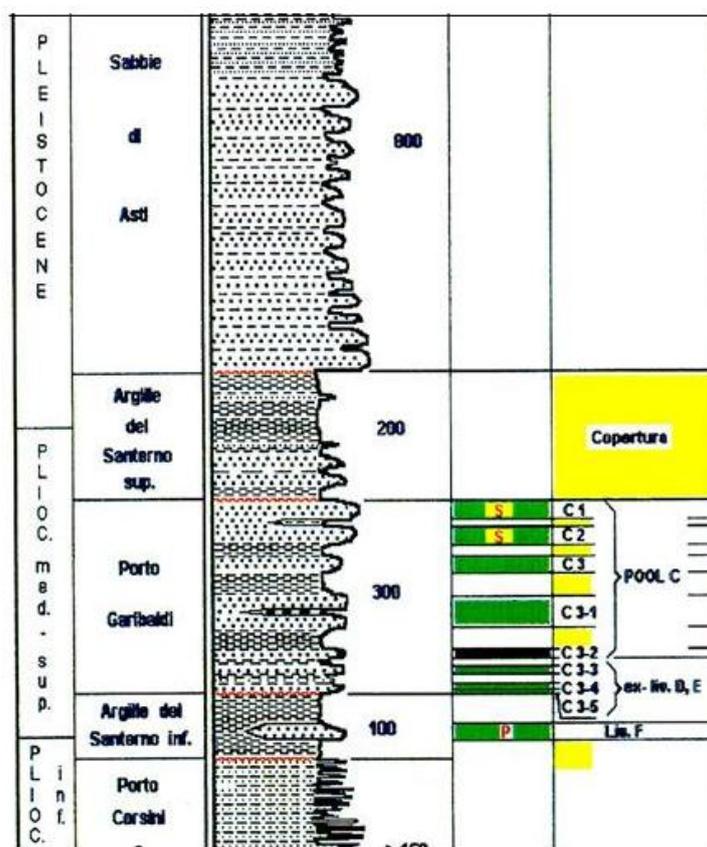


Fig. 2

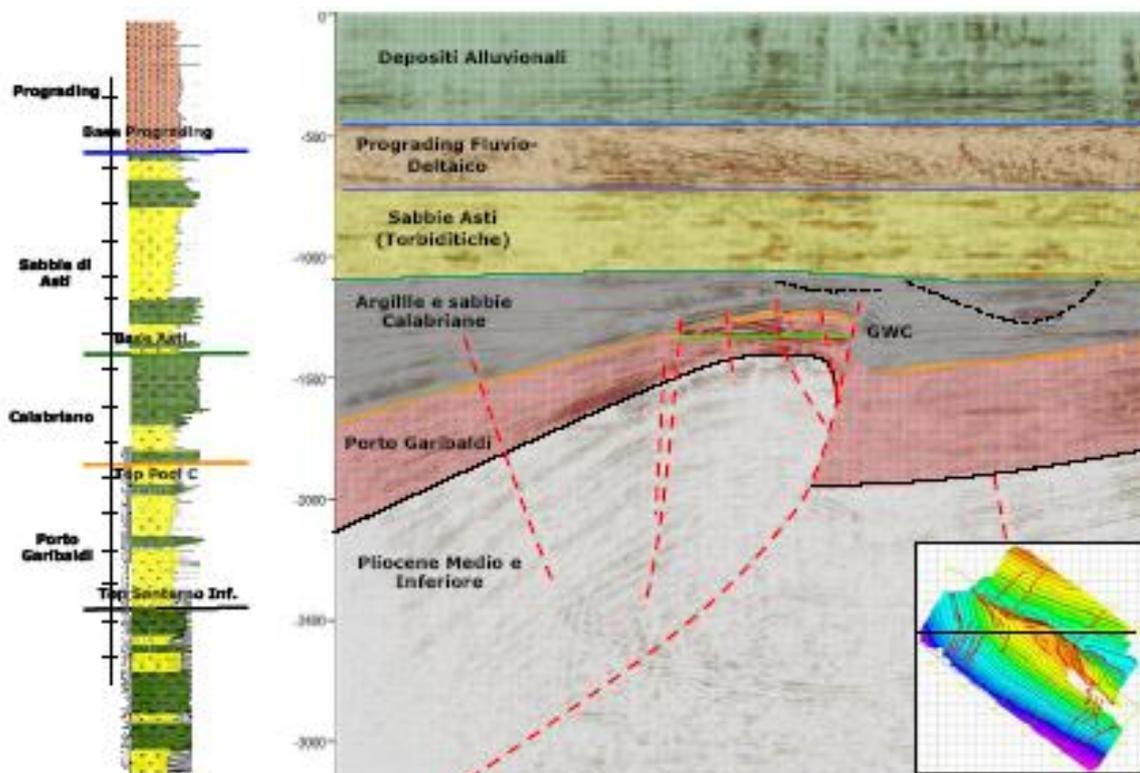


Fig. 3

Caratteristiche geominerarie

La scoperta del giacimento di Minerbio, risalente al 1956, avvenne nel corso delle prime fasi di prospezione e ricerca intraprese nell'area padana. Gli intervalli produttivi sono associati a livelli con elevata porosità primaria.

I livelli sabbiosi mineralizzati a gas sono compresi nella Formazione Porto Garibaldi, in particolare nel Pool C, in cui sono stati identificati otto livelli produttivi.

Lo spessore dei livelli sabbiosi utilizzati per lo stoccaggio raggiunge valori di circa 80 m. La pressione originaria di scoperta era pari a 152,4 kg/cmq. I valori medi di porosità delle sabbie sono pari al 30,6%, mentre la permeabilità è nell'ordine di 250 mD. Il Net/Gross (percentuale dello spessore delle sabbie rispetto a quello complessivo del livello) è nell'ordine del 90%. La temperatura registrata è di 41°C. Il contatto gas-acqua originario, determinato sulla base dei dati dei pozzi perforati prima della messa in produzione dei livelli, è stato individuato a 1370 m l.m. Il meccanismo produttivo del giacimento è legato ad una spinta dell'acquifero di media intensità.

Le correlazioni stratigrafiche evidenziano come il Pool C sia caratterizzato da progressiva chiusura stratigrafica dei corpi sabbiosi torbiditici lungo i fianchi dell'anticlinale di Minerbio-Selva. L'analisi dei rapporti stratigrafici e quella delle pressioni di fondo pozzo registrate durante la produzione primaria e la successiva fase

di stoccaggio evidenziano l'assenza di significative barriere laterali e verticali entro i livelli porosi del Pool C, per cui non si ipotizzano compartimentazioni fisiche ed idrauliche nel giacimento.

La fase di produzione primaria del giacimento si è protratta fino al 1971, con la perforazione di 36 pozzi, di cui 24 produttivi. Successivamente, a partire dal 1975, quattro livelli, di cui i più importanti sono quelli denominati C1 e C2, sono stati interessati alla conversione all'attività di stoccaggio, che attualmente si avvale di 51 pozzi di iniezione/erogazione organizzati in clusters e di 6 pozzi-spia per il monitoraggio delle pressioni di giacimento; tutti gli altri pozzi perforati nella fase di produzione primaria sono stati chiusi minerariamente.

3 - RILIEVO SISMICO 3D

Il rilievo sismico 3D, acquisito nel corso del 2010, era finalizzato alla caratterizzazione del giacimento dal punto di vista geologico-strutturale. L'attività si è articolata nelle seguenti fasi:

- acquisizione su una superficie di circa 95 kmq
- elaborazione dei dati ("Processing") con l'ausilio di software dedicati
- interpretazione dell'assetto geologico-strutturale del giacimento

Il rilievo sismico 3D, grazie all'elevato potere di risoluzione, ha consentito di acquisire informazioni geologico-strutturali di grande dettaglio rispetto a quelle precedentemente disponibili.

Acquisizione

Il rilievo, le cui operazioni si sono protratte dal 19 novembre 2010 al 28 gennaio 2011, è stato eseguito dal gruppo sismico DGS 2 della Società GEOTEC S.p.A., contrattista incaricata da Stogit, utilizzando come sorgenti di energia sia microcariche di esplosivo che vibroseis.

Il rilievo ha riguardato una superficie complessiva di circa 95 km², riferita a cinque Comuni della provincia di Bologna (fig. 4). Il ricorso alternativo alla tecnica a vibroseis si è reso opportuno in alcune aree urbane ed industriali in cui era sconsigliato l'utilizzo degli esplosivi, al fine di sopperire all'insufficiente grado di copertura.

L'acquisizione del rilievo, per il quale sono state ottenute specifiche autorizzazioni dagli enti competenti, è stata preceduta dalla messa a punto di uno studio di fattibilità operativa, per definizione dei parametri di acquisizione e delimitazione dell'area di indagine.

Il lavoro si è articolato cronologicamente in una serie di attività fra loro parzialmente concatenate secondo un processo modulare:

- fase di scouting preliminare, per verificare la fattibilità del posizionamento delle linee sismiche e dei punti di scoppio in progetto, considerando le caratteristiche del territorio (centri abitati, zone agricole, zone di vincolo ambientale, presenza di condotte interrate, ecc.)
- fase di permitting, per acquisire i permessi ad operare da parte dei proprietari dei terreni interessati dal rilievo e concordare entità e modalità di rimborso dei danni procurati alle coltivazioni, anche attraverso incontri con le associazioni di categoria
- operazioni topografiche, per determinare in tempo reale, con l'ausilio di tecnologia GPS (ricevitori mobili a doppia frequenza, registratori di dati con apposito software), la posizione esatta di ciascun punto di energizzazione e di registrazione, e procedere così al picchettamento dell'area interessata dalle operazioni
- perforazione dei pozzetti di profondità di 9 m per posizionamento di cariche di esplosivo con cui energizzare il terreno, a mezzo di perforatrici, con sistema a rotazione con circolazione diretta di fango
- utilizzo alternativo di tecnica vibroseis in prossimità di centri abitati
- stendimento di cavi e della strumentazione di registrazione (geofoni), lungo un grid predefinito di linee spaziate fra loro 320 m
- registrazione degli shot-points e dei punti di vibrata programmati ed elaborazione preliminare di una linea sismica per ogni swath, per verificare, con l'ausilio di un software specifico, la qualità del dato acquisito
- bonifiche dei terreni, consistente nella chiusura dei fori, nell'asportazione e nello smaltimento dei rifiuti prodotti (materiale di risulta, residui di perforazione) e nel ripristino del terreno interessato dal passaggio di automezzi.

La morfologia pianeggiante del territorio ha semplificato le operazioni topografiche, di perforazione e di stendimento cavi, condotte senza particolari problemi e rese difficoltose solo in presenza di avverse condizioni meteorologiche tipiche del periodo invernale.

Gradi di copertura non ottimali hanno interessato alcune zone poste in prossimità di centri abitati e di zone soggette a vincoli ambientali, peraltro in buona parte limitati sia dall'utilizzo di sorgenti vibroseis sia da undershooting.

La maggior parte dei punti sorgente sono stati registrati con carica di 2 kg in fori a 9 m per le sorgenti ad esplosivo e 2 sweeps di 16 secondi con due mezzi vibro per le

sorgenti vibroseis. Tuttavia, in prossimità di case, pozzi, strade e strutture antropiche in generale, la carica è stata opportunamente ridotta ad 1 kg o adottando la modalità low force (in genere in prossimità di tubazioni). Per ogni punto di registrazione sono state effettuate prove vibrometriche per verificare che l'entità delle vibrazioni fossero nei limiti di norma consentiti (DIN 4150). I risultati delle prove sono state spedite con cadenza settimanale alla Questura di Bologna, come richiesto nelle prescrizioni del Nulla Osta rilasciato per l'utilizzo di esplosivo.

L'analisi dei dati acquisiti evidenzia la buona qualità delle registrazioni del rapporto segnale/disturbo con entrambi i tipi di sorgente, solo localmente penalizzato in prossimità dei maggiori centri abitati e lungo le principali arterie stradali, in particolare l'autostrada A13.

Al risultato ottenuto ha contribuito la costante interazione tra la squadra operativa e i geofisici di Eni E&P, incaricati da Stogit della supervisione tecnica.

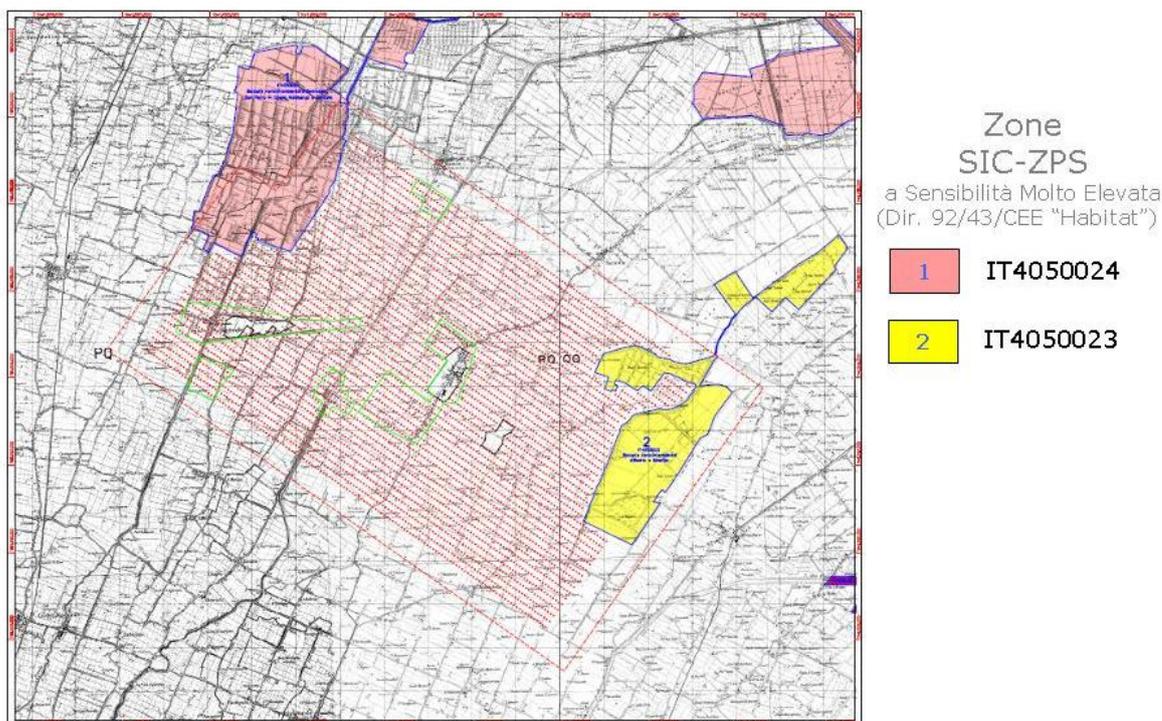


Fig. 4

Processing

L'elaborazione dei dati acquisiti è stata affidata da Stogit ad Unità specialistiche di ENI E&P, che si avvalgono di appositi software predisposti per tali attività.

La fase di processing ha inteso ottenere come prodotto finale un volume sismico migrato di qualità, tale cioè da permettere una corretta ricostruzione delle caratteristiche geologiche del reservoir (layering) e di eventuali elementi strutturali (discontinuità

tettoniche, piani di faglia).

Le principali difficoltà per raggiungere l'obiettivo indicato hanno riguardato la presenza di alcuni disturbi localizzati sui dati acquisiti (problemi di statiche residuali e di segnale disturbato, causato da interferenze in corrispondenza di centri abitati e strade). Una oculata fase di testing preliminare e la conseguente scelta di una adeguata sequenza di pre-condizionamento del dato sismico hanno permesso di attenuare in modo efficace tutti i tipi di noise presenti, consentendo di procedere alla vera e propria fase di elaborazione dei dati processing, disponendo di un materiale di buona qualità.

La buona risposta sismica dell'area non ha implicato la necessità di introdurre nella sequenza di processing nessun programma eccessivamente pesante. Gli step applicati hanno seguito un criterio di processing convenzionale ed un approccio di tipo "amplitude and frequency preserving". La sequenza di elaborazione è stata scelta per ottimizzare la risoluzione temporale e spaziale e per incrementare il rapporto segnale/disturbo senza introdurre effetti di mixing.

I procedimenti applicati (scelta della deconvoluzione, preservazione del campionamento originale, correzioni statiche residuali, scelta appropriata dell'algoritmo) hanno contribuito in maniera fondamentale a migliorare sia la definizione dell'assetto strutturale che l'imaging di buona parte dei riflettori, assicurando una ricostruzione affidabile delle strutture esistenti senza effetti di sovrarmigrazione nella zona di interesse.

Interpretazione geologica

L'obiettivo dello studio è stato quello di definire l'assetto geologico e strutturale del giacimento di Minerbio, attraverso la mappatura del top del livello sabbioso utilizzato per lo stoccaggio (Pool C) ed il riconoscimento dei principali lineamenti tettonici che lo scompongono (fig. 5).

Lo studio si è articolato dapprima nell'interpretazione in dominio tempi, con la definizione dell'assetto strutturale. La mappa così ricavata è stata successivamente convertita in dominio profondità, con calibrazione ai dati stratigrafici di tutti i pozzi, sia verticali che direzionati. Per la corretta taratura del dato sismico si è inoltre proceduto ad una calibrazione con i log di pozzo disponibili, verificando un buon grado di correlazione tra le due informazioni.

I principali risultati acquisiti grazie all'interpretazione geologica sono stati:

- la conferma della presenza di una zona di non-deposizione dei livelli sabbiosi nell'area sud-orientale del campo
- l'evidenza della presenza di una serie di faglie dirette, orientate circa nord-sud,

che ribassano la porzione orientale del campo, che risulta in parziale comunicazione con il settore principale, senza tuttavia creare compartimentazioni dal punto di vista dinamico

- l'identificazione di una serie di piccole faglie dirette di collasso, che interessano il settore culminale della struttura (faglie crestali) e che presentano rigetti modesti e immersione verso nord, anch'esse senza ripercussioni sulla continuità dinamica nel giacimento.

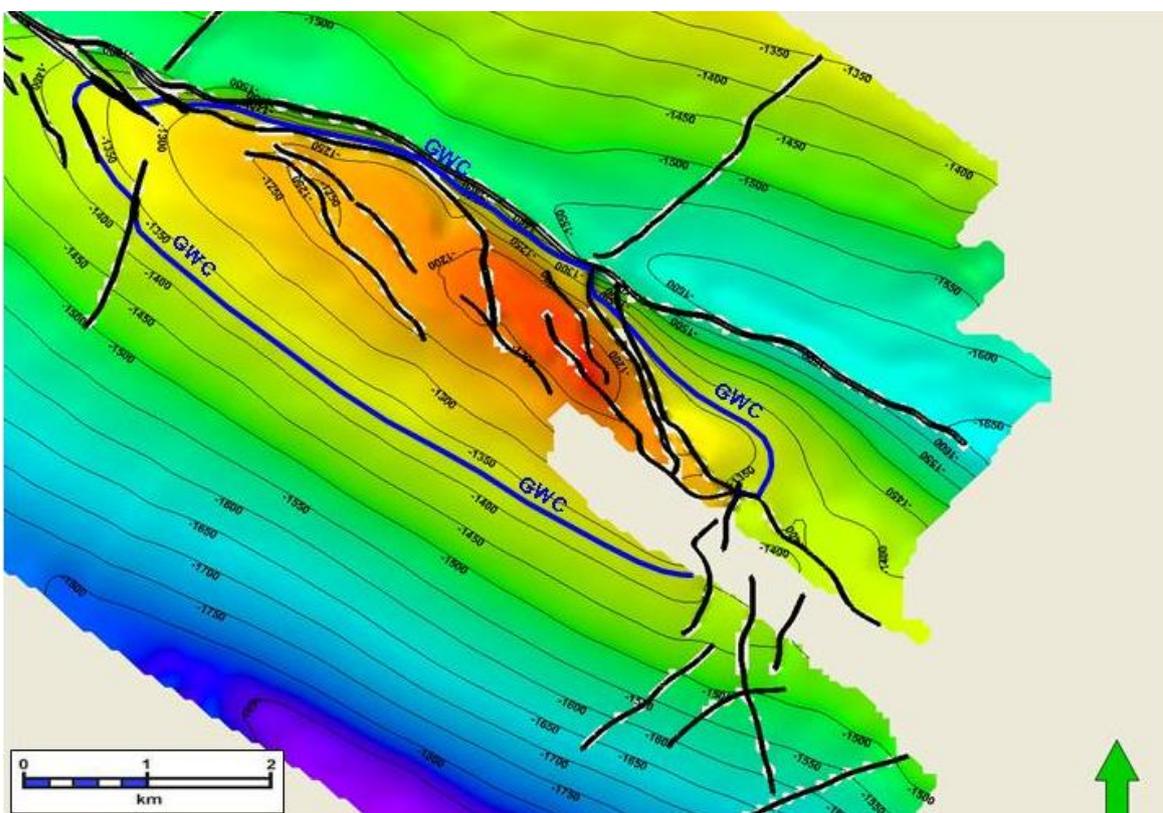


Fig. 5

4 - POZZO MINERBIO 85 DIR

Per l'acquisizione dei dati di pozzo si è fatto ricorso alla perforazione di un apposito sondaggio geognostico e di monitoraggio, denominato Minerbio 85 dir (giugno-agosto 2010), il cui programma operativo prevedeva le seguenti attività:

- esecuzione di prove "in situ" finalizzate alla raccolta di dati per la caratterizzazione geomeccanica della formazione di copertura
- prelievo di un set di carote di fondo per analisi delle caratteristiche granulometriche, mineralogiche, petrofisiche e geomeccaniche della formazione

di copertura e del livello di stoccaggio

- registrazione di log elettrici per valutazione delle caratteristiche geominerarie degli intervalli stratigrafici di interesse per le operazioni

Nei capitoli seguenti sono descritti i principali risultati di analisi e studi relativi a prove, carote e log di questo pozzo.

5 - PROVE DI FRATTURAZIONE IN SITU

Nel corso della perforazione del Pozzo Minerbio 85 dir sono state eseguite prove di microfratturazione idraulica “in situ” (MDT Stress Test) finalizzate alla caratterizzazione geomeccanica della formazione argillosa di copertura e mirate in particolare alla valutazione della pressione di fratturazione e del relativo gradiente, oltre che dello sforzo orizzontale in situ.

Queste prove consistono nel tentativo di generare una microfratturazione indotta dall'iniezione di acqua in un piccolo livello di formazione argillosa isolata tra packers; la frattura generata viene chiusa e riaperta nel corso di ripetuti cicli di iniezione. L'analisi del responso delle variazioni di pressione misurate nei vari cicli permette una stima del valore di “minimum stress in-situ (σ_3)”, indicativo delle proprietà geomeccaniche della formazione.

L'integrazione del dato con le evidenze dei log di immagine acquisiti prima e dopo il test consente di determinare il campo degli stress, poichè la frattura generata è solitamente orientata perpendicolarmente alla direzione di minimum stress.

Per l'acquisizione di questi dati si è proceduto all'esecuzione di un “Microfrac Test” e di una serie di misure con attrezzature MDT (contrattista incaricata Schlumberger), attraverso il posizionamento del tool in intervalli argillosi individuati sulla base dei log elettrici precedentemente registrati. Il posizionamento delle stazioni MDT è stato deciso analizzando ed integrando tutte le informazioni disponibili per il pozzo, tra cui principalmente:

- log convenzionali (porosità e resistività);
- masterlog (litologia e variazioni della velocità d'avanzamento);
- log FMI (giacitura degli strati e delle fratture, tipologia degli intervalli).

Sono stati effettuati test in open hole alle seguenti profondità misurate (MD): 1509 m, 1515 m e 1755 m; i tre intervalli sono stati precedentemente interessati da spari in foro scoperto con cariche tipo deep-penetration 12 spf, allo scopo di agevolare la creazione della frattura.

I test eseguiti a m 1509 e 1515 non sono risultati rappresentativi, in quanto i packer non hanno potuto fare tenuta durante l'iniezione, nonostante il foro in buone condizioni; si ipotizza che la causa sia da ricercarsi nell'estrema plasticità delle argille in questo intervallo, osservata sia sulle carote che dalle impronte lasciate dai packer sulla parete del foro.

Il test a m 1755 ha fornito invece un valore di minimum stress pari a 4315 psi (equivalenti a circa 303 kg/cm²), ricavato su tre cicli che evidenziano una buona ripetibilità dei parametri, e che consentono pertanto di valutare la pressione di chiusura della frattura indotta idraulicamente (fig. 6).

La misura ottenuta è ritenuta rappresentativa delle caratteristiche meccaniche della formazione argillosa considerata, in quanto i relativi grafici pressione vs. tempo individuano chiaramente i fenomeni di generazione e di propagazione della frattura indotta.

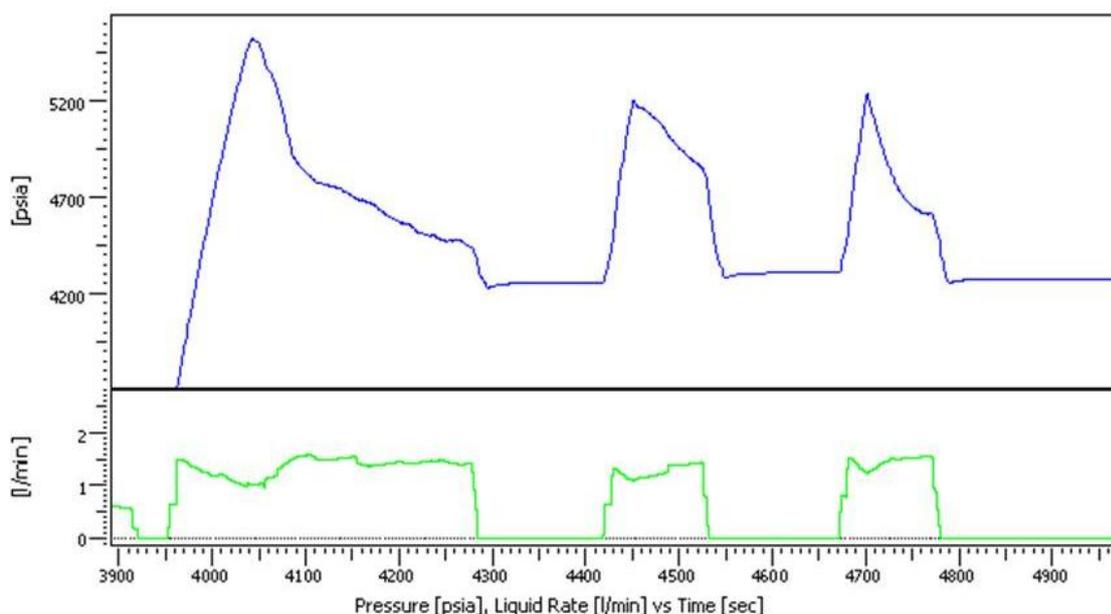


Fig. 6

6 - ANALISI GEOMECCANICHE SU CAROTE

La fase di caratterizzazione geomeccanica della copertura si è articolata attraverso l'esecuzione di varie analisi, fra cui prove triassiali per verifica del carico di rottura del sistema serbatoio-copertura e prove di pressione di soglia (threshold pressure) sulla roccia di copertura, per determinazione della tenuta idraulica.

Gli esiti di queste indagini hanno permesso di caratterizzare le proprietà geomeccaniche dei terreni soprastanti al livello di stoccaggio, che sono risultate quelle

tipiche di materiali poco permeabili (comportamento di barriera). Le analisi sono state eseguite presso i Laboratori di Geomeccanica di ENI E&P.

Nelle argille di copertura i valori di threshold pressure sono compresi tra 30 bar e 50 bar (fig. 7); valori inferiori (10 bar) riguardano la carota 6, prelevata in realtà nell'interlayer argilloso del reservoir, che evidenzia anche valori di porosità e di grain density differenti rispetto alle carote prelevate nelle argille di copertura (n. 1-2-3).

I risultati ottenuti dalle prove triassiali mostrano una buona qualità delle rocce di copertura, con coesioni che variano da 0.7 ad 1.3 MPa ed angoli di attrito che passano da circa 21 a circa 28 gradi. Gli angoli di attrito sono correlati alla coesione ed aumentano con la profondità. I parametri di deformabilità non mostrano invece una chiara relazione con la profondità.

Le prove edometriche mostrano una netta correlazione tra il modulo di compressione e la profondità, che testimonia un effetto geostatico sulle caratteristiche meccaniche della copertura.

Nelle argille basali, sottostanti ai livelli sabbiosi del reservoir, le treshold pressure sono comprese in un range tra 10 e 25 bar, compatibile con la loro natura argillosa che non rappresenta formazione di copertura.

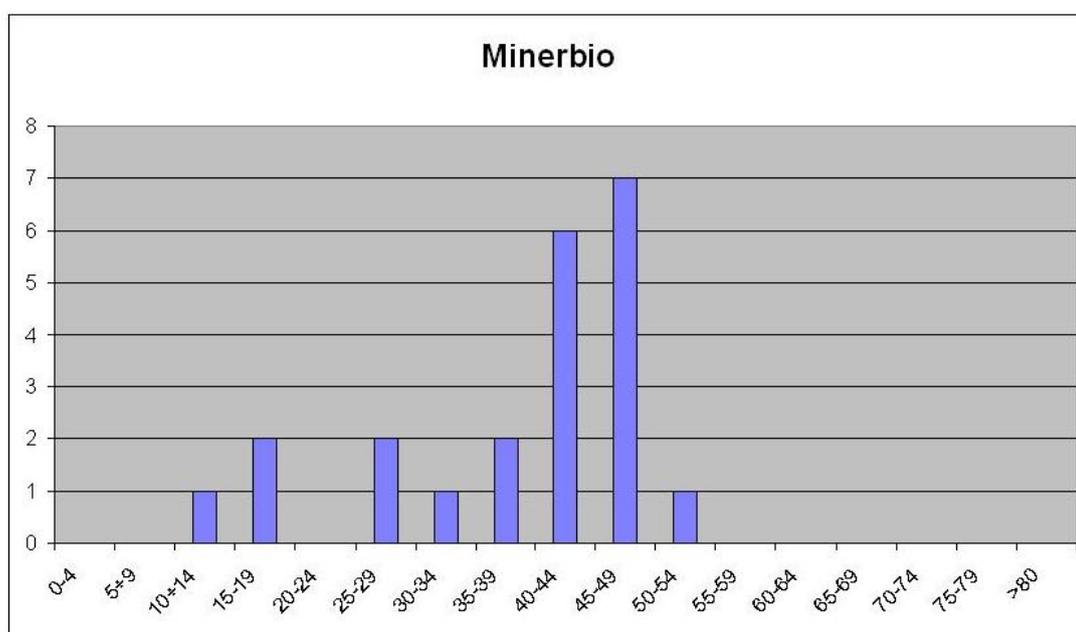


Fig. 7

7 - STUDIO PETROFISICO

Lo studio petrofisico condotto ha inteso integrare in un quadro coerente le informazioni provenienti dall'analisi delle carote e dai log elettrici acquisiti nel pozzo Minerbio 85 dir.

L'analisi eseguita e i risultati conseguiti sono illustrati in riferimento alle tre principali porzioni della sequenza investigata identificate su base litologico-stratigrafica. Tali porzioni coprono i seguenti intervalli partendo dall'alto stratigrafico (profondità misurate):

- Argille di copertura : 1365-1527 m
- Reservoir (F.ne Porto Garibaldi) : 1527-1741 m
- Argille basali : 1741–1775 m

Argille di copertura

L'intervallo corrispondente alle argille di copertura presentano un foro di scadente qualità con fenomeni di scavamento generalizzati, di ovalizzazione più o meno accentuati e di zone con breakout. A causa della cattiva condizione del foro, molti log acquisiti sono risultati di scarsa qualità (in particolare neutron, risonanza magnetica e microresistività); pertanto la caratterizzazione petrofisica in questi intervalli risulta poco attendibile.

Questa sequenza è costituita prevalentemente da argille (smectite ed illite) e da minori percentuali di silt (mica e carbonati).

L'analisi dei log di immagine ha evidenziato stratificazione mal definita nella parte superiore, mentre nella porzione immediatamente sopra il *reservoir* domina una pendenza strutturale con laminazioni argillose ad angolo abbastanza elevato, generalmente non inferiore a 30° ed immersione verso NE.

La fratturazione naturale è caratterizzata da numero limitato di fratture, per lo più rappresentate da fenomeni di taglio con strike medio NNW-SSE.

L'orientazione dei fenomeni di breakout ha un valore medio di 100°N (WNW-ESE). Neppure in prossimità dei rari fenomeni di fratturazione, anche laddove questi sono associati a taglio, si sono potute identificare deviazioni significative rispetto a questi andamenti prevalenti.

Le analisi di laboratorio effettuate sui dati di carota hanno evidenziato i seguenti risultati:

- Porosità: min. 14.3% max 28.2%
- Grain Density: min. 2.675 g/cc, max 2.782 g/cc

- Permeabilità: min. < 1.E-06 mD, max 1.73E-04 mD

GIACIMENTO Il giacimento è costituito da una sequenza sedimentaria sabbiosa di circa 200 m, cui si aggiunge un secondo livello reservoir di spessore decisamente inferiore, dell'ordine di qualche metro. L'intervallo reservoir principale è posto a profondità 1527-1741 m. Tale intervallo risulta essere prevalentemente sabbioso, con una composizione mineralogica caratterizzata da una predominanza di quarzo, con presenza secondaria di mica e argille. La porosità effettiva stimata presenta valori compresi tra circa 10 e 29 p.u., con una media di 24 p.u. Il volume di acqua presente nello spazio poroso è prevalentemente rappresentato da acqua libera. I valori di SW sono del 100%. I valori di permeabilità (sia da carote, da Risonanza Magnetica Nucleare e da onda acustica Stoneley) indicano un reservoir con buona permeabilità, i cui valori vanno da pochi mD a 1000 mD. I valori di saturazione in acqua irriducibile (SWI) da NMR sono confrontabili con quelli ottenuti su carote dalle curve di pressione capillare.

L'analisi del log di immagine mostra, da un punto di vista tessiturale, una sequenza con caratteristiche dominate da livelli di tipo eterolitico, con forte contrasto resistivo-conduttivo e marcata planarità degli eventi: la pendenza strutturale media risulta costante con immersione verso NE. Localmente si hanno basi di tipo erosivo con giacitura discordante ed orizzonti disturbati da fratturazione naturale.

L'intervallo è caratterizzato da tre zone strutturali con minime differenze in termini di inclinazione ed azimuth della pendenza, con immersione dominante verso NE e tendenza all'aumento dell'inclinazione verso la parte bassa.

La fratturazione naturale si presenta con maggiore variabilità sia in termini di tipologia degli eventi che in termini di orientazione. Si ha un'orientazione dominante N-S e due set secondari orientati con strike NW-SE e NNE-SSW. Prevalgono fratture resistive anche se sono rappresentati fenomeni di taglio.

Sono presenti eventi di faglia a scala sub-sismica, di cui quella più significativa è la zona collocata nella porzione superiore del *reservoir*, associata a fenomeni di taglio e parziale deformazione delle laminazioni e dei letti di strato presenti nelle immediate vicinanze. L'angolo medio di queste superfici di faglia è attorno a 40-60° con strike orientato NNW-SSE.

Dal punto di vista acustico, nel reservoir emerge chiaramente la presenza di anisotropia piuttosto importante (15-18 %) legata ad un meccanismo di stress in-situ e con un fast shear azimuth orientato NE10-20.

Il calcolo della curva di permeabilità dall'analisi delle onde Stoneley mostra lo stesso

andamento e lo stesso valore assoluto della curva di permeabilità calcolata dai dati CMR (valore medio 600-800 mD).

Il profilo di velocità delle onde shear attorno al foro mostra un'alterazione di circa 8-10" nelle sabbie del reservoir.

Le analisi effettuate sui dati di carota hanno evidenziato i seguenti risultati:

Analisi di routine:

- Porosità: min. 26.3%, max 38.7%
- Grain Density: min. 2.714 g/cc, max 2.785 g/cc
- Permeabilità orizzontale: min. 2.73 mD, max 1550 mD
- Permeabilità verticale: min. 4.66 mD, max 1220 mD
- Il valore cumulativo di "m" è 1.23.

Analisi speciali:

- Le pressioni capillari danno Swi comprese fra 5.8 e 25.1% PV.
- I valori di "n" sono compresi fra 1.39 e 2.11.
- Le permeabilità geostatiche evidenziano riduzioni di permeabilità comprese fra il 17.8 ed il 56.1%.
- Le riduzioni di porosità sono comprese fra il 6.3 e il 9.4%.

Le prove edometriche mostrano una netta correlazione tra il modulo di compressione e la profondità, che testimonia un effetto geostatico sulle caratteristiche meccaniche della copertura.

Argille basali

La condizione del foro nelle argille basali è decisamente migliore rispetto a quelle di copertura. Sono presenti fenomeni di ovalizzazione legati a breakout di tipo incipiente e con spessore più modesto (4.6 m in sviluppo verticale).

Dal punto di vista tessiturale si presentano due facies principali: una massiva e con maggiore rugosità della parete ed una più laminata con migliori condizioni della sezione del foro.

L'intervallo mostra pendenza strutturale omogenea immergente verso NE con angolo medio di 30°.

La fratturazione naturale è caratterizzata da un numero limitato di fratture per lo più rappresentate da fenomeni di taglio con strike medio NNW-SSE.

Nella porzione basale, si osserva una rotazione delle ovalizzazioni verso NW-SE (124°N), che potrebbe essere legata alle strutture tettoniche che attraversano la porzione delle sabbie.

Le buone condizioni del foro permettono un'analisi dell'anisotropia acustica attendibile, che risulta essere di tipo intrinseco (layering ad alto angolo) con un fast shear azimuth NW60.

Nelle argille, dove il foro è di buona qualità, non si notano variazioni significative di velocità radiale dell'onda shear.

8 - MODELLIZZAZIONE STATICA E DINAMICA 3D

Per definire le modalità ottimali di gestione e per valutare le prestazioni potenziali del campo di stoccaggio di Minerbio Pool C, in relazione al programmato esercizio in regime di sovrappressione, è stato realizzato un nuovo studio di giacimento, basato sui risultati del recente rilievo sismico 3D.

Il lavoro, condotto in collaborazione tra il Politecnico di Torino e Stogit, si è articolato in una prima fase di modellizzazione statica 3D, messa a punto con l'ausilio del software 3D Petrel, e nella successiva fase di modellizzazione dinamica 3D del giacimento.

Sulla base delle simulazioni numeriche eseguite per i diversi scenari ipotizzati sono state analizzate le risposte del sistema, evidenziando le scelte operative più opportune per la gestione del campo.

Modellizzazione statica 3D

La realizzazione del nuovo modello statico del giacimento di Minerbio è stata finalizzata alla ricostruzione dell'assetto geologico e strutturale, attraverso una modellizzazione dei corpi sedimentari che costituiscono i livelli di stoccaggio (Pool C) e dei principali lineamenti tettonici ad essi associati.

La definizione del modello statico si è articolata attraverso la revisione di tutti i dati di pozzo e di giacimento disponibili, raccolti sia durante la fase di produzione primaria che dopo la conversione all'attività di stoccaggio. In particolare sono stati presi in considerazione tutti i log di pozzo (Potenziale Spontaneo, Resistività, Neutron-Density, Sonic), per l'individuazione dei top formazionali e per la conseguente messa in profondità delle mappe sismiche. Per ricostruire la "zonazione" dei livelli mineralizzati (C1, C2, C3, C3-1) e per effettuare le opportune correlazioni stratigrafiche è stato creato un *database* con il software 3D Petrel.

L'interpretazione sismica ha evidenziato che la struttura di Minerbio è un'anticlinale asimmetrica interessata da piani di faglia che danno luogo a rigetti verticali massimi sino ad un centinaio di metri. I piani di faglia hanno un andamento sub-parallelo al fronte della struttura e, verso il limite sud-est del giacimento, piegano in direzione sud. Per la rappresentazione del sistema di faglie principale si è scelto di ricostruire le faglie che, per estensione ed entità dei rigetti, sono state ritenute indispensabili alla corretta descrizione dell'assetto strutturale del campo.

Il grid del modello statico è stato realizzato mediante un processo articolato in più fasi, allo scopo di ottenere una discretizzazione in grado di rappresentare in maniera ottimale le strutture del giacimento. A tal fine si è posta particolare attenzione alla definizione dell'andamento delle faglie che interessano la zona nord-est del giacimento, e alle relazioni geometriche esistenti tra i livelli porosi. Per limitare il numero totale delle celle e, di conseguenza, ridurre i tempi nella successiva fase di simulazione dinamica, i volumi porosi non mineralizzati non sono stati rappresentati. La sub-layerizzazione verticale è stata effettuata solo nei due livelli superiori, interessati dallo stoccaggio (C1 e C2). Il grid è stato orientato secondo l'asse principale della struttura.

Una volta generata la struttura del grid si è proceduto alla definizione degli orizzonti stratigrafici principali, corrispondenti ai top strutturali dei corpi porosi che costituiscono il reservoir. Le superfici di input utilizzate sono state quelle sismiche, previamente rielaborate per la loro corretta messa in profondità. La suddivisione verticale del volume del giacimento è stata realizzata in modo da rispettare, nel modo più fedele possibile, le geometrie dei corpi sedimentari presenti all'interno del *Pool C*.

Ai fini della caratterizzazione petrofisica è stata eseguita una *cluster analysis*, basata principalmente sui dati *log* di potenziale spontaneo disponibili, oltre che sull'unico CPI disponibile (pozzo Minerbio 34) e sui dati di carota (pozzi Minerbio 1, Minerbio 2, Minerbio 10, Minerbio 37, Minerbio 84 e Minerbio 85 dir di recente perforazione).

Sulla base del CPI eseguito al pozzo Minerbio 34 il valore di porosità media per la facies sabbiose varia da 19,9% a 24,4%, mentre dall'analisi da carote risulta un valore medio della distribuzione di circa 28%. L'analisi dei dati da carota indica una permeabilità orizzontale media di giacimento di circa 250 mD.

A partire dai risultati della *cluster analysis* è stata definita una mappa di Net /Gross e sono stati calcolati i valori di porosità e di saturazione in acqua per ogni livello.

L'analisi dei risultati della *cluster analysis* ha evidenziato una variabilità media del NTG compresa tra 0,7 e 1, ad eccezione della zona nord-orientale, in corrispondenza del pozzo Minerbio 19, che presenta un NTG medio di circa 0,4. Il valore medio di NTG è di circa 0,9 per i livelli C1, C2, C3 e di 0,65 per il livello C3-1.

Dall'analisi di dettaglio della variazione spaziale del NTG, per quanto riguarda i livelli C1 e C2 si evidenzia una tendenza all'aumento della frazione argillosa verso la zona orientale del campo, in prossimità della zona di non deposizione, con NTG variabile tra 0,4 e 0,9.

Modellizzazione dinamica 3D

Sulla base del modello statico generato e della revisione della storia produttiva pregressa si è proceduto ad un aggiornamento del modello dinamico 3D del campo al 31.10.2010 (fine ricostituzione del ciclo termico 2010/2011).

La modellizzazione dinamica ha preso in considerazione gli aspetti evidenziati dallo studio geologico, quali la presenza di eterogeneità petrofisiche e di intercalazioni argillose che rallentano il flusso in direzione verticale e che sembrano avere un sensibile impatto sulla comunicazione tra i livelli del giacimento; inoltre la zona settentrionale del campo, il cui contributo allo stoccaggio è peraltro trascurabile, è interessata da un sistema di faglie con rigetti variabili, in grado di limitare la possibilità di comunicazione idraulica.

Anche il sistema idraulico associato risente di queste complessità geologiche e strutturali, per cui l'acquifero presenta un comportamento molto articolato e differenziato nelle varie zone del giacimento. In fase di modellizzazione si è pertanto optato per definire un acquifero periferico che agisce su tutto il contorno del campo ad eccezione della zona orientale, in degradazione di facies, e della zona nord, dove è ubicata la faglia principale.

Il modello dinamico messo a punto (fig. 8-9), costituito complessivamente da 127x37x7 celle (32.893), di cui 5871 attive, è stato finalizzato in particolare ai seguenti obiettivi:

- valutazione del comportamento del giacimento nel tempo nell'ipotesi di ricostituzione del campo alla pressione iniziale del giacimento e di erogazione durante la fase di svasso sino ad una pressione minima di testa pozzo rispettivamente pari a 75, 70, 60 e 45 barsa;
- valutazione del comportamento del giacimento nel tempo nelle ipotesi di ricostituzione del campo ad una pressione di giacimento pari al 104%, 107%, 110%, 115% 120% della pressione originale del giacimento, con erogazione durante la fase di svasso sino ad una pressione minima di testa pozzo pari a 75 e 70 barsa;
- valutazione dell'effetto dell'alienazione dei pozzi del *cluster* A e dell'eventuale chiusura di tali pozzi in relazione alla perforazione di nuovi pozzi orizzontali;

- definizione dei possibili vantaggi, in termini di *working gas* e di prestazioni di punta, conseguibili a seguito della realizzazione di un pozzo addizionale nella zona sud-est del campo;
- individuazione della sequenza ottimale di apertura dei pozzi nelle modalità di gestione attuali del campo e dell'eventuale accorpamento dei pozzi in blocchi predefiniti, operati in remoto mediante telecontrollo.

La simulazione del comportamento dinamico del campo di Minerbio è stata effettuata in tre fasi: inizializzazione, *history match* e previsioni di produzione (*forecast*).

Nella fase di inizializzazione è stato costruito il modello geometrico tridimensionale del giacimento, tenendo conto delle mappe strutturali e delle caratteristiche petrofisiche dei livelli riconosciuti dallo studio geologico, nonché del contatto gas/acqua e delle caratteristiche termodinamiche dei fluidi di giacimento.

Nella fase di *history match* sono state effettuate delle simulazioni del comportamento dinamico del giacimento, variando progressivamente i parametri di campo e di pozzo fino ad ottenere una buona riproducibilità delle portate storiche di produzione ed iniezione del gas, delle portate storiche di produzione dell'acqua (laddove disponibili) e delle misure statiche di pressione a fondo pozzo registrate durante la vita del campo.

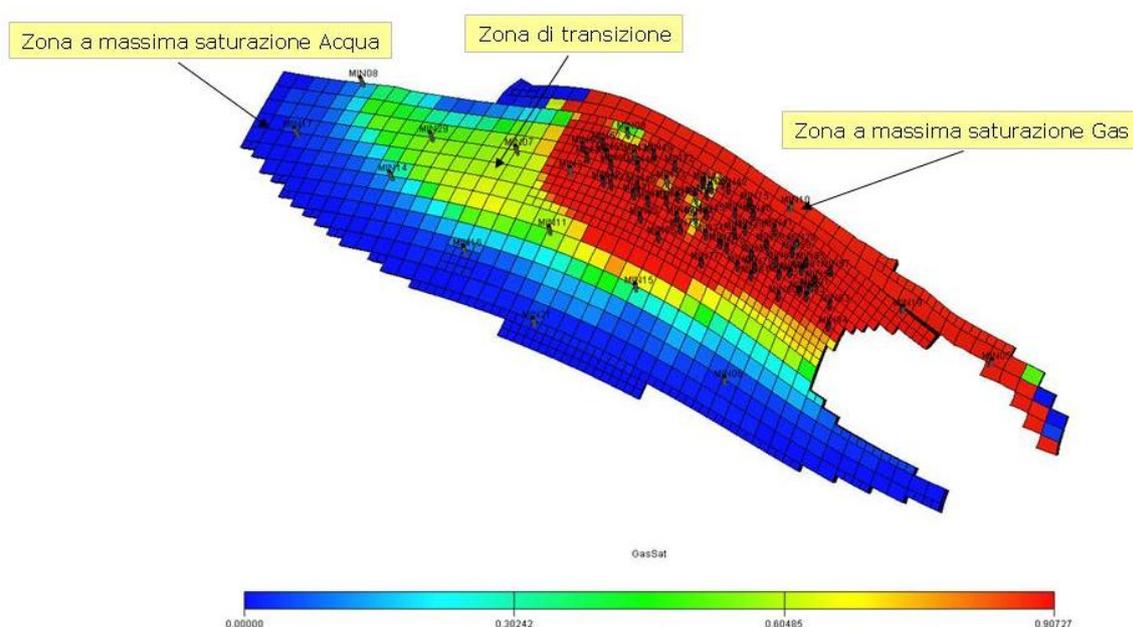
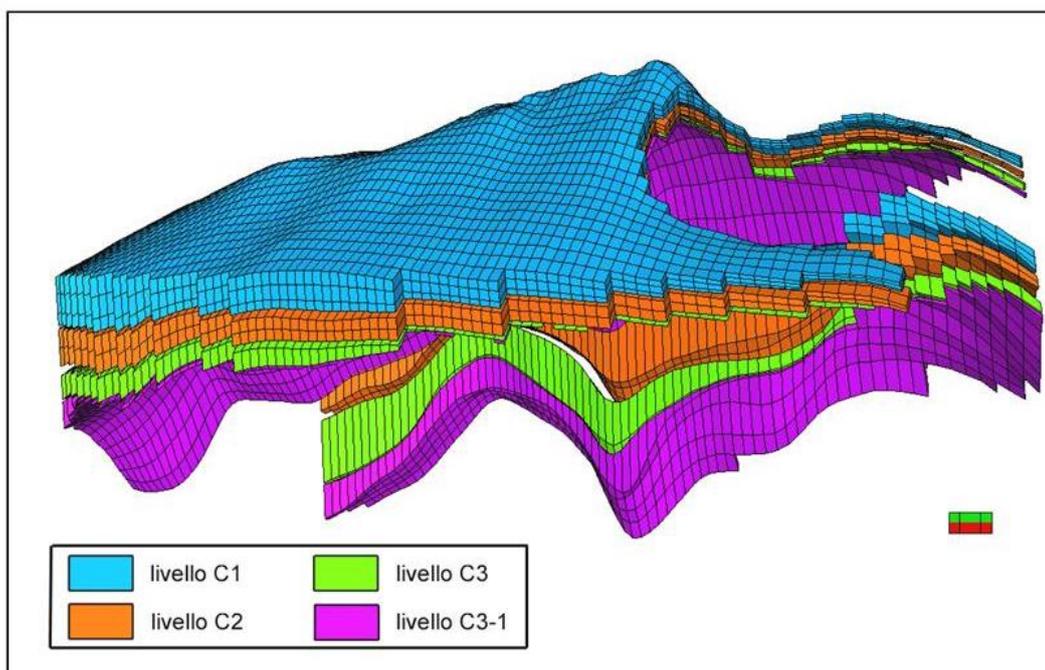


Fig. 8

**Fig. 9**

Una volta calibrato il modello sono state effettuate delle previsioni del comportamento del giacimento secondo diversi criteri di svasso e di ricostituzione, con l'obiettivo di individuare possibili strategie di gestione o scenari di sviluppo del campo che consentano un miglioramento dell'efficienza delle attività di stoccaggio.

Il volume di Working Gas ottenuto dalla simulazione dei cicli di stoccaggio in condizioni di svasso normale, assegnando una pressione minima di testa pozzo in condizioni di erogazione pari a 70 barsa e 75 barsa, e senza imporre vincoli in termini di massima differenza tra la pressione statica e dinamica a testa pozzo, risulta pari a rispettivamente pari a 2530,44 e a 2276,42 MSmc.

Il volume originario del gas in posto (GOIP) è stato calcolato per via dinamica per tutti i livelli mineralizzati del campo (C1, C2, C3 e C3-1) e per la zona a nord della faglia principale, parzialmente isolata dalla restante parte del giacimento. I valori del GOIP dinamico per ciascun livello sono stati calcolati in seguito alla calibrazione dei parametri petrofisici sulla base dell'*history match*. In fase di calibrazione è stato infatti necessario ritoccare il valore di saturazione in acqua irriducibile, posto pari al 10% in tutto il campo, per riprodurre in modo soddisfacente la produzione e il tempo di arrivo dell'acqua ai pozzi.

Il GOIP dinamico risulta pari a 14.038 MSmc, con un grado di incertezza valutabile nell'ordine del 1%. Il volume di GOIP è contenuto principalmente nei livelli C1 e C2

(84% circa). Il GOIP dinamico che compete alla zona del campo a nord della faglia risulta pari a 706 MSmc; tale frazione concorre solo in modo parziale alla definizione del GOIP effettivo, in quanto la comunicazione tra la zona a nord della faglia ed il resto del giacimento risulta molto rallentata dalla presenza della faglia stessa, a cui è stata attribuita una trasmissività molto bassa.

Nel giacimento è presente un acquifero laterale di media intensità che ha determinato un ingresso importante di acqua durante il periodo di produzione primaria. L'ingresso di acqua è continuato anche durante il periodo di chiusura del campo, attenuandosi progressivamente sino ad annullarsi verso la metà del 1981, in fase di ricarica. L'ingresso di acqua in giacimento ha comportato una sensibile riduzione irreversibile del volume utilizzabile per lo stoccaggio, pari a circa il 55% rispetto al volume poroso occupato da gas nelle condizioni originali. Durante la fase di stoccaggio non si registrano movimenti importanti del fronte di acqua, ma soltanto variazioni cicliche della saturazione in gas in una fascia laterale trascurabile che circonda la zona di stoccaggio.

Superamento della pressione iniziale di giacimento

In relazione al progetto di superamento della pressione statica originaria di scoperta (al datum di 1334 m l.m.) $153,4 \text{ kg/cm}^2_a$ ($p_i = 150,4$ barsa), sono stati esaminati alcuni scenari di *forecast* per valutare i corrispettivi aumenti dei volumi di Working Gas. Sono state valutate in particolare cinque diverse opzioni, con pressione pari rispettivamente al 104%, 107%, 110%, 115% e 120% della pressione iniziale.

I risultati evidenziano un ampio margine di miglioramento delle prestazioni del campo. In particolare le simulazioni numeriche per un esercizio con $P=107\% P_i$, indicano una potenzialità del volume di Working Gas pari a circa 2950 MSmc, con un incremento di 420 MSmc rispetto alla situazione a $P=P_i$.

Recupero della capacità di stoccaggio in Underpressure

Nell'ambito dello studio è stata messa a punto, tramite simulazioni con modello dinamico 3D, una metodologia operativa per la definizione di criteri di valutazione della stabilità nell'erogazione di volumi a pressioni di testa pozzo inferiori alle pressioni del metanodotto (underpressure).

La metodologia adottata ha permesso di calcolare il volume di Working Gas ricostituibile ogni anno in modo stabile nel tempo sia in erogazione spontanea (natural depletion) che in underpressure con l'ausilio di unità di compressione in estrazione.

Lo studio ha avuto come obiettivo la riclassificazione nel campo di Minerbio di una parte del volume di Pseudo Working Gas (inteso come differenza tra il Working gas

erogabile spontaneamente a 70 barsa e il Working Gas del ciclo di emergenza a 45 barsa) come working gas addizionale ed esercibile stabilmente tramite l'utilizzo di unità di compressione in un ciclo di stoccaggio. Il volume di Pseudo Working Gas rimanente viene considerato come componente del Cushion Gas.

Nell'ambito dello studio è stata inoltre messa a punto, tramite simulazioni con modello dinamico 3D, una metodologia operativa per la definizione di criteri di valutazione della stabilità nell'erogazione di volumi a pressioni di testa pozzo inferiori alle pressioni del metanodotto (underpressure). I risultati ottenuti indicano un incremento di working gas di 342 MSm³ in condizioni di F.T.H.P@ 60 barsa rispetto al valore di Working Gas esercibile a P=Pi con F.T.H.P. @ 70 barsa di 2.530 MSm³.

9 - MODELLIZZAZIONE GEOMECCANICA

Lo studio geomeccanico ha avuto come scopo l'individuazione delle condizioni tensionali e deformative che si realizzano nel giacimento di stoccaggio di Minerbio e nella sovrastante cap-rock, in relazione a differenti pressioni di esercizio.

La possibilità di analizzare correttamente il comportamento geomeccanico delle formazioni rocciose profonde comprendenti il campo di Minerbio ha richiesto la messa a punto di un modello geologico esteso, in cui è stata ricostruita la geometria dell'intera sequenza che si estende dal piano campagna fino a una profondità di 4500 m. Per la modellizzazione di dettaglio di giacimento sono state utilizzate le superfici acquisite per la realizzazione del modello statico del *Pool C*, successivamente estese per 13 km in direzione N, per 18 km in direzione S, per 15 km in direzione E e, infine, per 18 km in direzione O, in accordo con l'andamento regionale del *top* della sequenza a cui appartengono. La dimensione finale delle superfici è quindi di circa 32x39 km. Ai soli fini della modellizzazione geomeccanica, ovvero per eliminare gli effetti di bordo e per garantire la stabilità delle simulazioni, il modello è stato poi ulteriormente esteso, sino a raggiungere dimensioni in pianta di 60x70 km e una profondità di circa 20 km. La discretizzazione spaziale del volume del modello è stata ottimizzata in modo da riprodurre accuratamente tutti i fenomeni di interesse ma, allo stesso tempo, minimizzare il numero di celle complessivo e quindi contenere i tempi di calcolo. Nella porzione del modello che contiene il giacimento, in cui si verificano le variazioni di pressione più significative, è stata definita una griglia di dimensioni 60x60 m. Al di fuori della zona di maggior interesse, dove le differenze di pressione sono minime o trascurabili, la dimensione delle celle aumenta progressivamente verso i bordi del modello. La discretizzazione verticale è stata definita in modo da riprodurre accuratamente la sequenza dei livelli sabbiosi utilizzati per lo stoccaggio sotterraneo

del gas. Il volume complessivo del modello è costituito da un *grid* che comprende 163x88x38 celle.

La simulazione dinamica della storia produttiva passata e futura del campo di Minerbio ha compreso la valutazione dell'evoluzione delle pressioni nel giacimento e nell'acquifero che lo delimita e i potenziali fenomeni di infiltrazione del gas nelle argille di copertura. La possibilità che l'acqua contenuta nelle argille venga spiazzata da parte del gas iniettato in giacimento dipende dal valore della *threshold pressure*, ovvero dal valore della pressione capillare di soglia. Infatti, la penetrazione del gas nelle argille può aver luogo solo se la differenza tra la pressione interstiziale del giacimento e quella della copertura supera il valore di soglia; in caso contrario le due zone risultano idraulicamente separate. Le caratteristiche petrofisiche delle argille schiette della copertura, in particolare porosità, permeabilità e *threshold pressure*, sono state ottenute mediante prove di laboratorio su campioni prelevati al pozzo Minerbio 85dir ad una profondità compresa tra 1200 e 1300 m. Tuttavia, per tener conto di possibili variabilità areali, le simulazioni dei potenziali fenomeni di *leakage* del gas attraverso la copertura hanno anche incluso un'analisi parametrica delle proprietà delle argille. L'analisi dei risultati ottenuti ha consentito di verificare che i volumi di gas infiltrati all'interno della *cap rock* tendono ad aumentare progressivamente nel tempo, ma che lo spessore della copertura interessato dalla filtrazione non si estende generalmente oltre un metro anche dopo 10 cicli di iniezione del gas in giacimento a pressioni medie superiori al valore della pressione iniziale della formazione.

La simulazione del comportamento meccanico del campo di Minerbio è consistita nella valutazione dell'evoluzione delle tensioni efficaci e delle deformazioni della roccia indotte dalle attività storiche di produzione primaria e di stoccaggio. Sono state quindi effettuate previsioni del comportamento futuro del sistema secondo differenti scenari di gestione del campo in condizione di sovrappressione.

La filosofia d'analisi adottata si avvale di un approccio integrato geomeccanico-fluidodinamico di tipo *one-way coupling*, secondo cui al modello geomeccanico viene applicata l'evoluzione delle pressioni nel tempo ottenuta dalle simulazioni effettuate con il modello dinamico calibrato. Il ricorso ad un approccio più complesso, infatti, quale quello di tipo *iteratively coupling*, viene generalmente riservato allo studio delle formazioni fortemente compressibili.

Dall'esame dei dati di laboratorio disponibili sia per la roccia di giacimento sia per la copertura e in base ai risultati di un'accurata ricerca bibliografica, è stata costruita un'opportuna legge costitutiva e sono stati valutati i relativi parametri di deformabilità. Come criterio di failure è stato adottato quello di Mohr–Coulomb tridimensionale,

imponendo opportuni parametri di resistenza. In tutte le simulazioni effettuate si è verificato che il sistema manifesta sempre un comportamento puramente elastico, ampiamente lontano dal raggiungimento della soglia di plasticizzazione. Quando il comportamento è di tipo elastico, è valido il principio di sovrapposizione degli effetti ed è quindi possibile effettuare simulazioni che comprendono più fasi di produzione primaria, ricostituzione e cicli di stoccaggio. La necessità di utilizzare un modello numerico complesso, quale quello messo a punto per Minerbio, che consentisse di esaminare separatamente le varie fasi è dovuta dalla presenza di faglie che influenzano la distribuzione delle pressioni dei fluidi e, di conseguenza, delle tensioni efficaci nelle diverse parti del giacimento. È stata quindi valutata la risposta del modello al termine della produzione primaria (aprile 1971), al termine della fase di ricostituzione alla pressione di scoperta del giacimento, al termine di un ciclo di svasso in condizioni normali che prevede il raggiungimento di una pressione minima di testa pozzo pari a 75 bar ed, infine, in corrispondenza di una pressione massima operativa del campo rispettivamente pari al 107% e 120% della pressione iniziale del giacimento.

I parametri di deformabilità e resistenza delle formazioni sono stati prevalentemente ricavati da dati bibliografici e da studi su formazioni analoghe a quelle in esame, mentre la caratterizzazione geotecnica svolta dall'Eni sulle carote è soprattutto significativa per i moduli dinamici. Per quanto riguarda i parametri di deformabilità statica, le prove svolte dall'Eni (triassiali consolidate non drenate) hanno un valore solo indicativo per il presente lavoro in quanto i campioni vengono sollecitati a valori di deformazione superiori di almeno un ordine di grandezza rispetto alle condizioni reali di sollecitazione in situ. Per quanto riguarda, infine, i parametri di resistenza, sono stati scelti valori molto più cautelativi di quelli ottenuti dalle prove triassiali effettuate.

Nonostante l'utilizzo di parametri di resistenza conservativi, l'analisi dello stato tenso-deformativo del sistema mostra che, per tutti gli scenari analizzati, sussistono condizioni di sicurezza sia rispetto alla rottura per fessurazione delle argille di copertura sia rispetto alla plasticizzazione della roccia serbatoio. Il criterio di resistenza adottato, ovvero quello di Mohr-Coulomb, assume che la resistenza per attrito aumenti all'aumentare delle tensioni efficaci.

Le condizioni di stabilità vengono espresse mediante il parametro di *failure*, che rappresenta la distanza dalle condizioni di plasticizzazione. Valori negativi di *failure* denotano un comportamento stabile, mentre valori prossimi allo zero segnalano una possibile evoluzione verso la plasticizzazione. A seguito della produzione (produzione primaria o fase di erogazione durante un ciclo di stoccaggio) si registra un aumento delle tensioni efficaci, che porta il sistema a raggiungere stati tensionali ancora più stabili (valori di *failure* negativi) rispetto alle condizioni iniziali. Le condizioni

potenzialmente più critiche, viceversa, si realizzano in fase di iniezione, quando si ha una riduzione delle tensioni efficaci. Tuttavia, in tutti i casi analizzati i valori di *failure* si mantengono sempre negativi e lontani da condizioni di rottura.

La massima subsidenza dovuta alla produzione primaria, calcolata in modo conservativo, è risultata pari a circa 7 cm in corrispondenza del culmine del Pool C. Le variazioni altimetriche del piano campagna durante i cicli di stoccaggio normali, quando durante lo svasso si raggiunge una pressione minima di testa pozzo pari a 75 barsa, si mantengono minori di 4 cm nel caso di ricostituzione del campo alla pressione iniziale e minori di 5 cm nel caso di gestione del campo in condizioni di sovrappressione.

Infine, l'effetto delle faglie interne al giacimento può essere così riassunto. Gli sforzi normali alle pareti di faglia dovuti alla gravità sono così elevati da determinare resistenze a taglio anch'esse elevate e di molto maggiori degli sforzi di taglio agenti calcolati mediante le simulazioni. Dal momento che la pressione indotta dalle attività di iniezione aumenta ulteriormente questi sforzi normali, le condizioni di stabilità delle faglie aumentano ulteriormente durante la gestione del campo in condizioni di sovrappressione.

10 - TENUTA MECCANICA DEI POZZI

Nell'ambito del progetto sono state eseguite, con il contributo di unità specialistiche di Eni E&P, verifiche sulle attrezzature dei pozzi, mirate all'accertamento delle condizioni di sicurezza degli stessi in previsione dell'esercizio a pressioni superiori a quella originaria del giacimento.

Lo studio di assessment è stato eseguito prevedendo un incremento della pressione di stoccaggio per il giacimento di Minerbio fino ad un massimo del +10% rispetto a quella originaria, al fine di ottenere indicazioni sulla fattibilità di tale incremento per quanto riguarda l'integrità meccanica dei pozzi. Lo studio ha riguardato i seguenti aspetti:

- Verifica della resistenza dei casing di produzione
- Verifica della resistenza dei completamenti

Verifica del casing di produzione

Lo studio è stato effettuato sui soli casing di produzione considerando cinque diversi tipi di pozzo rappresentativi dei diversi profili di tubaggio presenti nel campo di Minerbio.

Per quanto riguarda i gradienti di pressione delle formazioni, sono stati assunti valori medi rappresentativi del campo; in particolare sono state considerate una pressione di reservoir di 165,6 bar (110% Pi), ed una pressione massima di iniezione prevista di

174,0 bar.

Il risultato dei calcoli secondo i criteri esposti è che tutti i casing di produzione sono verificati. Il valore minimo del Safety Factor a Burst è pari a 1.38 per il casing 7" (pozzi tipo 1) ed il valore minimo del Safety Factor a Collasso è pari a 1.19 per il casing 6-5/8" (pozzi tipo 5).

Va osservato comunque che nell'ipotesi di uno svuotamento totale del casing di produzione (come previsto dalle procedure aziendali di verifica a collasso), la contemporanea presenza nell'intercapedine casing di produzione – casing intermedio di pressioni maggiori dei valori limiti indicati nello studio (variabili a seconda della tipologia di pozzo) porterebbe al collasso del casing di produzione. Pur nella remota probabilità di questa evenienza, poiché attualmente alcuni pozzi del campo presentano nelle intercapedini casing di produzione- casing intermedio valori di pressione compresi tra 35 e 40 bar, si provvederà a monitorare il fenomeno e la sua evoluzione nel tempo attraverso campagne di controllo e di campionamento dei fluidi presenti nelle intercapedini e operazioni di scarico sotto i valori limite.

Verifica del completamento

Lo studio è stato effettuato analizzando individualmente i 58 pozzi del campo, al fine di considerare le differenti dimensioni dei tubing, i diversi tipi di packer, le densità dei brine di completamento, le deviazioni dei pozzi, l'effettiva procedura di completamento e le pressioni presenti nei singoli annulus tubing - casing di produzione.

I carichi considerati sono i più conservativi in tutto il ciclo di lavoro del completamento.. Sono stati analizzati i carichi dovuti a: produzione, shut-in, iniezione, iniezione iniziale. Inoltre sono stati considerati i seguenti carichi di malfunzionamento: perdita di gas durante l'iniezione, svuotamento della string.

Le portate di produzione e di iniezione considerate sono pari a 2.000.000 Nmc/g.

Per tutte le condizioni di produzione e di iniezione gas si è considerata al fondo la pressione massima pari a 165, 6 bar, pari al 110% Pi.

Per tutte le condizioni di carico sono stati calcolati i Safety Factor triassiali, i Safety Factor a collasso, le reazioni vincolari sul Packer e gli eventuali accorciamenti del tubing.

Dall'esame delle analisi eseguite risulta che tutti i Safety Factor triassiali e a collasso sono accettabili per le condizioni di carico esaminate.; unicamente per il pozzo Minerbio 58 è raccomandata un'iniezione con temperatura a testa-pozzo maggiore a 20°C.

Le analisi riguardanti le forze di trazione e di compressione sul packer e gli accorciamenti del tubing sono risultati accettabili per tutte le condizioni di carico considerate.

11 - ASSESSMENT DEGLI IMPIANTI DI SUPERFICIE

Nell'ambito del progetto sono stati compiuti opportuni accertamenti volti a verificare l'idoneità degli impianti di superficie (facilities di centrale e condotte di adduzione del gas) alle prestazioni richieste. In particolare lo studio intrapreso ha preso in considerazione i seguenti aspetti in relazione alla pressione di esercizio programmata, pari al 107% Pi:

- verifica dell'idoneità degli spessori delle tubazioni di adduzione gas, dalla centrale di compressione al giacimento
- determinazione della massima pressione operativa della mandata compressori
- verifica dell'idoneità delle apparecchiature esistenti.

La tabella seguente riporta l'esito delle verifiche eseguite per stabilire la massima pressione a cui possono operare le tubazioni selezionate. Lo spessore considerato è stato quello nominale depurato della tolleranza di fabbricazione e del sovrappessore di corrosione specificato nella relativa classe di linea.

Si evince che tutte le tubazioni interessate dalla sperimentazione possono operare a pressioni superiori a 147 barg, valore di intervento dei pressostati PSXH 10A/B/C installati sul manifold di distribuzione da 24" la cui attivazione determina il blocco dei turbocompressori in logica 2 su 3.

I pozzi 32, 34, 35, 42, 43, 44 e 45 del cluster E/E1 saranno eserciti unicamente a condizioni P=Pi e verranno esclusi dall'esercizio in modalità P>Pi.

La presenza nel cluster C1 di apparecchiature progettate ad una pressione di 144 barg (separatori) ne ha imposto la sostituzione con altre idonee alle nuove condizioni operative; l'installazione dei nuovi apparecchi è già stata ultimata e la loro pressione di bollo è di 165 barg. In tutti gli altri clusters le apparecchiature installate hanno pressione di progetto di 150kg/cmq→147barg e risultano già idonee alla pressione di stoccaggio prevista nella fase di sperimentazione.

Pertanto la pressione limite di esercibilità delle facilities in condizioni di sovrappressione pari al 107%Pi non deve superare il valore di 147 barg.

TUBAZIONE	Spessore Nominale (mm)	Materiale Linea	Spessore effettivo (mm)	P. op. max (barg)
COLLETTORI DI MISURA FISCALE				
Linea 20"-20-P1-76B	31.75	API 5LGrB	26.51	150.9
Linea 16"-20-P3.76B	25.4	API 5LGrB	20.95	149.3
GASDOTTI DA CENTRALE A CLUSTERS				
Linea 20"-20-P413-76B Da C.le a Clusters A-D	31.75	API 5LGrB	26.51	150.9
Linea 20"-20-P411-D99 Da C.le a Clusters A-D	22.22	API 5LGrX52	18.44	155.96
Linea 20"-20-P409-76B Da C.le a Clusters BEE1C	31.75	API 5LGrB	26.51	150.9
Linea 20"-20-P407-D99 Da C.le a Clusters BEE1C	22.22	API 5LGrX52	18.44	155.96
Linea 14"-20-P417-76B Da C.le a Cluster C1	23.83	API 5LGrB	19.58	159.1
Linea 14"-20-P415-D99 Da C.le a Cluster C1	15.88	API 5LGrX52	12.89	155.6
INTERCONNESSIONE CLUSTERS				
Linea 14"-14-P1-76A Da Cluster A a Cluster D	23.83	API 5LGrB	19.58	159.1
Linea G200-14-14"-D01 Da Cluster B a Cluster C	23.83	API 5LGrB	19.58	161.3
LINEE TESTE POZZO – FLOW LINES				
Linea 6"-76A	12.7	API 5LGrB	9.84	169.4
Linea 4"-76B	8.56	API 5LGrB	6.22	157.8
LINEE ALIMENTO GAS A COLONNE DI DISIDRATAZIONE				
Linea 12"-76A	20.62	API 5LGrB	16.77	149.7
Linea 12"-D01	20.62	API 5LGrB	17.04	152.1

12 - PROGRAMMA DI MONITORAGGIO

Le attività di monitoraggio sono finalizzate alla verifica del corretto esercizio del giacimento a pressione superiore a quella originaria di scoperta, attraverso l'esecuzione di un piano di controlli mirati.

Il sistema di monitoraggio intende verificare il contenimento del gas all'interno del giacimento di stoccaggio in tutte le condizioni di funzionamento previste ed in base alle principali criticità geostrutturali e dinamiche.

Premessa

Le metodologie prese in considerazione, in parte già consolidate in precedenti analoghi progetti, sono inserite in un progetto integrato in grado di fornire un panorama completo sia per quanto riguarda il contesto geologico che quello ambientale ed antropico.

Il programma di monitoraggio, calibrato anche in base alle principali caratteristiche geostrutturali e dinamiche del giacimento e alla massima pressione di esercizio prevista, si inquadra nell'ottica perseguita da Stogit di coniugare l'incremento delle prestazioni operative con elevati standard di sicurezza.

Il programma operativo messo a punto per l'esercizio del Pool C a P>Pi, distinto in una fase di attuazione immediata (**monitoraggio di base**) e in una successiva e integrativa, a maggiore contenuto tecnologico, in parte sperimentale (**monitoraggio avanzato**), si avvale delle seguenti metodologie di indagine:

MONITORAGGIO DI BASE

(operatività immediata)

- MISURE DI PRESSIONE E DI SATURAZIONE GAS-ACQUA
- MONITORAGGIO ALTIMETRICO CON INTERPRETAZIONE IMMAGINI DA SATELLITE

Nella concessione di Minerbio è inoltre attiva fin dal 1979 una rete microsismica adibita al

- MONITORAGGIO MICROSISMICO DI SUPERFICIE

MONITORAGGIO AVANZATO

(operatività in parte immediata e in parte a medio termine)

- MONITORAGGIO SISTEMA POZZI
- MONITORAGGIO GEOCHIMICO-AMBIENTALE
- MONITORAGGIO MICROSISMICO E GEODETICO DI POZZO

Misure di pressione e saturazione in gas-acqua

Il programma messo a punto intende acquisire una serie di informazioni finalizzate alla misurazione dell'incremento di pressione e della saturazione in gas-acqua in alcuni pozzi appositamente predisposti per le operazioni.

Il programma operativo di monitoraggio riguardante le acquisizioni di dati di pressione e di saturazione gas/acqua è suddiviso nelle seguenti fasi:

- fase 1: raggiungimento pressione originaria ($P=P_i$)
- fase 2: raggiungimento + 4% della pressione originaria ($P=104\% P_i$)
- fase 3: raggiungimento + 7% della pressione originaria ($P=107\% P_i$)

I pozzi interessati dalle operazioni sono i seguenti (fig. 10):

- pozzo Minerbio 21: ubicato in posizione strutturale propizia per il monitoraggio della tavola d'acqua, con acquisizione di log RST
- pozzo Minerbio 83 dir A: dotato di strumentazione per monitoraggio continuo in tempo reale dei valori di pressione di fondo pozzo con attrezzatura DPTT wireline; acquisizione di informazioni di riferimento per la cadenza delle operazioni programmate
- pozzi Minerbio 35 - 50 dir: monitoraggio dei valori di pressione attraverso la discesa di memory-gauges
- pozzi Minerbio 45 dir – 47 dir – 53 dir – 55 dir – 65 dir – 68 dir – 82 dir: monitoraggio dei valori di pressione con registrazione periodica di profili statici

Il programma operativo prevede le seguenti attività:

Fase 1: $P=P_i$

- Acquisizione log RST: pozzo Minerbio 21
- Registrazione valori di pressione:
 - pozzo Minerbio 83 dir A (DPTT wireline)
 - pozzi Minerbio 35 – 50 dir (Memory-gauges)
 - pozzi Minerbio 45 dir – 47 dir – 53 dir – 55 dir – 65 dir – 68 dir – 82 dir (registrazione profilo statico)

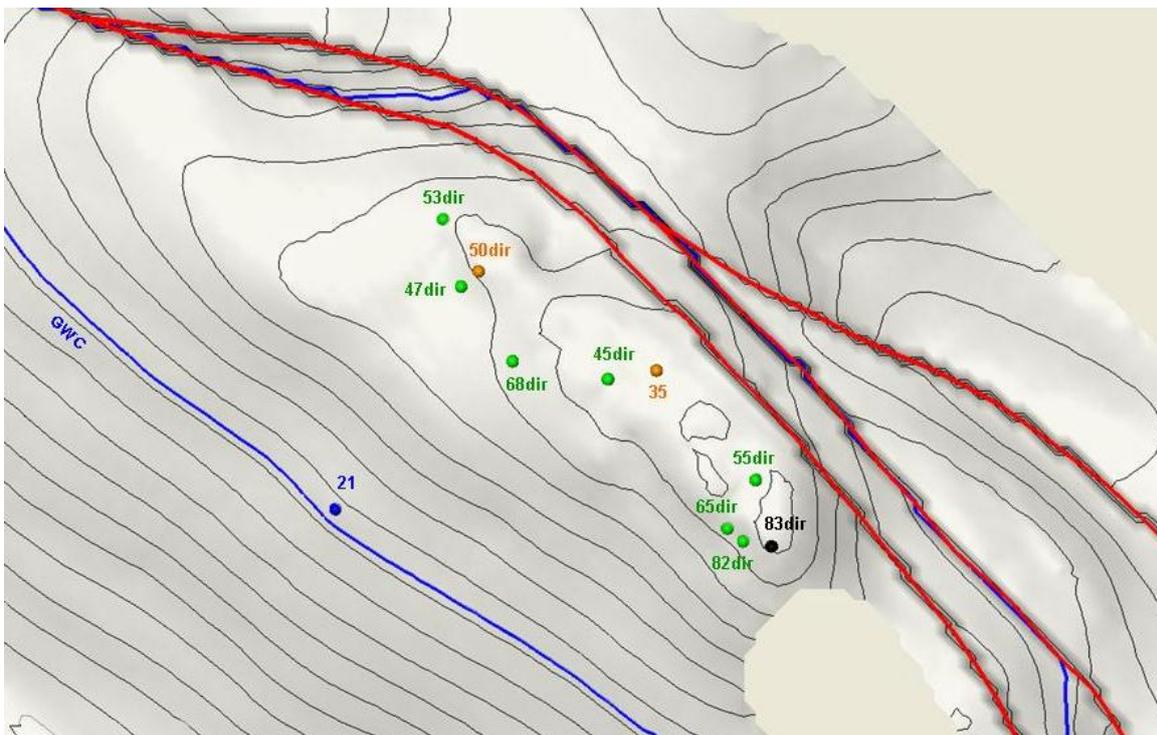
Fase 2: $P= + 4\% P_i$

- Registrazione valori di pressione:
 - pozzo Minerbio 83 dir A (DPTT wireline)

- pozzi Minerbio 35 – 50 dir (Memory-gauges)
- pozzi Minerbio 45 dir – 47 dir – 53 dir – 55 dir – 65 dir – 68 dir – 82 dir (registrazione profilo statico)

Fase 3: P= + 7% Pi

- Acquisizione log RST: pozzo Minerbio 21
- Registrazione valori di pressione:
 - pozzo Minerbio 83 dir A (DPTT wireline)
 - pozzi Minerbio 35 – 50 dir (Memory-gauges)
 - pozzi Minerbio 45 dir – 47 dir – 53 dir – 55 dir – 65 dir – 68 dir – 82 dir (registrazione profilo statico)



RST

Profili statici

DPTT

Memory-gauges

Fig. 10

Monitoraggio altimetrico con interpretazione di immagini da satellite

Obiettivo di questo monitoraggio è la misura diretta delle deformazioni dei terreni, utilizzando dati satellitari Radar ad Apertura Sintetica (SAR).

Il programma di monitoraggio dei movimenti del suolo prevede un aggiornamento dei dati con cadenza annuale, attraverso l'acquisizione e l'interpretazione delle immagini satellitari disponibili relative al sito.

Monitoraggio microsismico di superficie

La rete microsismica di Minerbio è stata installata nel 1979. Negli anni di operatività della rete sono stati registrati solo pochi eventi a carattere locale, peraltro non correlabili allo stoccaggio in quanto esterni all'area o più profondi del giacimento. Tale sismicità è riconducibile all'attività tettonica delle vicine strutture appenniniche. La rete microsismica è tuttora operativa, data la valenza strategica del giacimento e l'esistenza di una sporadica attività sismica a livello strumentale.

MONITORAGGIO AVANZATO

Monitoraggio sistema-pozzi

Il monitoraggio del sistema pozzi è finalizzato alla verifica dello stato di corrosione dei materiali metallici e al controllo e manutenzione delle varie attrezzature, al fine di garantirne l'integrità meccanica. I controlli per verifica della corrosione vengono effettuati periodicamente tramite una serie di rilevamenti, esami visivi, campagne di misure o eventualmente log, in concomitanza con interventi di pozzo (*workover*).

Monitoraggio geochimico-ambientale

Per i progetti P>Pi si rende opportuno provvedere anche ad un monitoraggio finalizzato al controllo delle dinamiche di diffusione/migrazione del gas nel giacimento e alla verifica dell'assenza di diffusione nelle falde, nei suoli e in aria. Il monitoraggio geochimico - ambientale si effettua mediante un sistema integrato di controllo con rilievi fissi e mobili, acquisiti in continuo, e con campagne periodiche con tecniche di remote sensing, puntuali e areali, con campionamenti di falde, suoli ed aria, discriminando tra le componenti "naturale locale" ed "indotta dal sito" e individuandone l'associabilità alle fonti di origine. Il programma è attualmente in fase di definizione attraverso uno studio di caratterizzazione di dettaglio del sito, attività propedeutica alla progettazione delle reti di controllo e alla programmazione di campagne mobili di rilevamento che saranno attuate con l'esercizio del giacimento a P>Pi.

Monitoraggio microsismico e geodetico di pozzo

L'installazione in pozzo di strumentazione microsismica consiste nella posa di geofoni triassiali e di inclinometri per il controllo geodetico della variazione di inclinazione della formazione in esame, integrati in una serie di "moduli strumentati" distanziati di alcune

decine di metri e posti lungo la parte inferiore del pozzo. Il programma prevede l'installazione nel pozzo Minerbio 85 dir, di recente perforazione (2010) ed espressamente dedicato al monitoraggio del giacimento, di una serie di moduli strumentali attualmente in fase di progettazione avanzata.

13 – RISULTATI DEL MONITORAGGIO NELLA FASE DI SPERIMENTAZIONE

A seguito di specifica autorizzazione ministeriale durante il ciclo di stoccaggio 2011-2012 è stata eseguita una prova di iniezione sperimentale mirata a verificare operativamente la fattibilità dell'esercizio in sovrappressione fino al 107%Pi.

Nel corso della fase di sperimentazione si è raggiunto un valore di pressione medio in giacimento a fine campagna di 158,4 barsa, corrispondente a circa il 105% della pressione originaria, a fronte di un volume iniettato in condizioni di sovrappressione di 356 MSmc. Non è stato possibile raggiungere il volume di progetto iniziale della sperimentazione, pari a 420 MSmc al 107% della Pi, a seguito del mancato approvvigionamento del gas dai clienti; tuttavia i risultati del test realizzato consentono comunque di affermare la fattibilità dei volumi previsionali del progetto.

I risultati dei monitoraggi effettuati durante la sperimentazione all'esercizio in sovrappressione (Ciclo di stoccaggio 2011-2012) indicano che le operazioni di stoccaggio non hanno comportato criticità nella gestione del campo di Minerbio e che tali operazioni si sono svolte nel rispetto delle prescrizioni indicate nella nota M.S.E. n. 0016614 del 19 agosto 2011.

Monitoraggio delle pressioni di giacimento

La fase di iniezione del ciclo di stoccaggio 2011/2012, iniziata in aprile e terminata a fine ottobre 2011, ha portato in giacimento un volume di 1813 MSmc, di cui 356 MSmc in condizioni di sovrappressione. A fine campagna di iniezione, nella zona di culmine del giacimento, è stata raggiunta una pressione statica media pari a circa il 105% della pressione originaria.

La pressione media in giacimento in relazione all'andamento della portata in iniezione non ha mai superato il vincolo di legge imposto da MSE; il valore massimo raggiunto è stato di 143,0 barg il giorno 15 ottobre.

Il monitoraggio in continuo della pressione di giacimento è stato eseguito nei pozzi Minerbio 83 mediante l'utilizzo di un DPTT gauge per l'intera durata della campagna iniettiva da aprile 2011 e nei pozzi 50 e 35 mediante memory gauge alloggiati per il periodo corrispondente alla fase di ricostituzione in sovrappressione da agosto 2011.

La fig. 11 illustra il confronto tra l'andamento delle pressioni di giacimento monitorate in corrispondenza dei pozzi Minerbio 35, Minerbio 50 e Minerbio 83 durante la fase di ricostituzione (aprile - ottobre 2011) e la corrispondente portata di iniezione di gas a livello di campo.

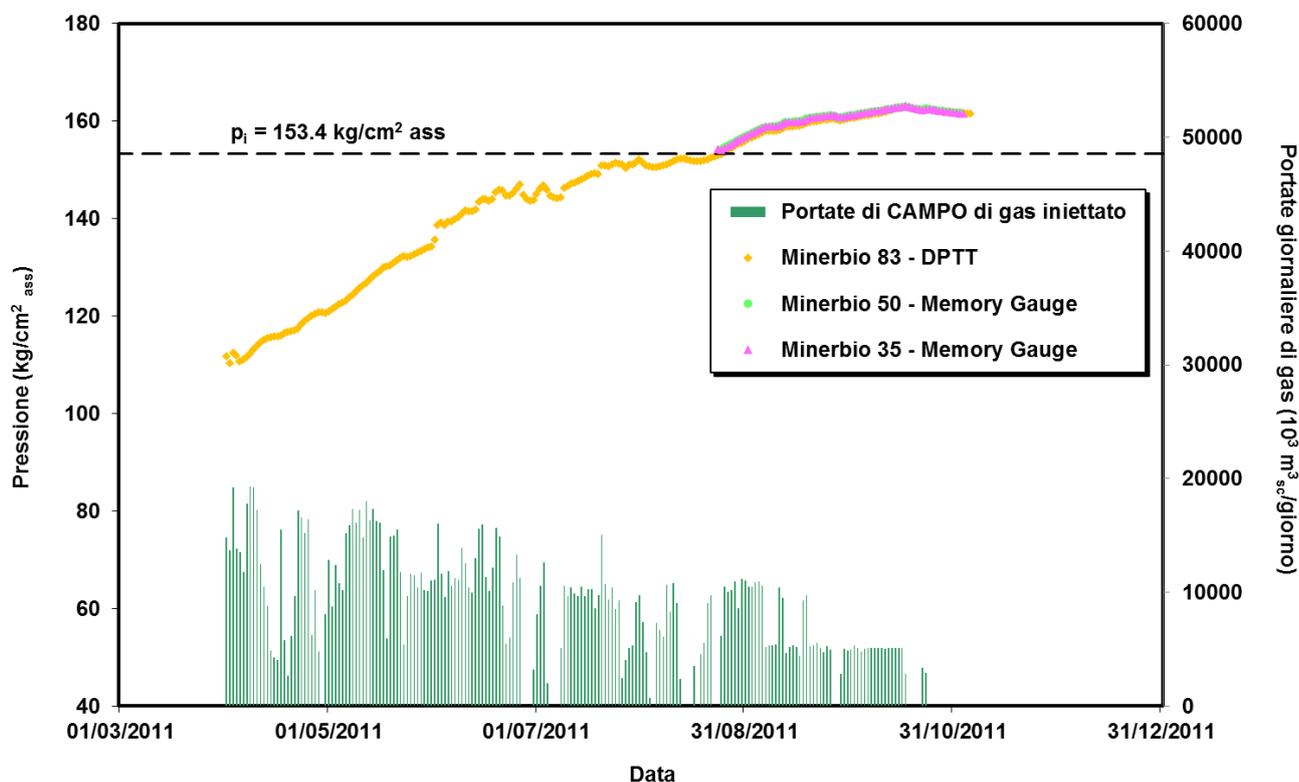


Fig. 11

I valori di pressione registrati ai pozzi 83, 35 e 50, sempre inferiori al limite massimo di legge 161 barsa, possono essere considerati rappresentativi dell'andamento medio della pressione di campo ed hanno evidenziato una ottima omogeneità sull'intero giacimento.

Nel corso della fase di iniezione sono state eseguite quattro campagne di registrazione di profili statici di pressione e temperatura, che hanno interessato i pozzi Minerbio 35, 45, 47, 50, 53, 55, 65, 68, 82 e 83. Le operazioni sono state eseguite con la seguente cadenza:

- all'inizio della fase di ricostituzione (23-25 marzo 2011)
- in corrispondenza di valori della pressione di giacimento prossima alla pressione originaria, circa 150.9 barsa (23 e 24 agosto 2011)
- in corrispondenza di valori della pressione di giacimento pari a circa 157,6 barsa, equivalente a circa 104.7% Pi (27-28 settembre 2011)

- in corrispondenza di valori della pressione di giacimento pari a circa 158,4 barsa, equivalente a circa 105% P_i (2-4 novembre 2011)

Si evidenzia che il valore massimo di pressione raggiunto in condizioni dinamiche in giacimento è stato di 159,7 barsa ($162,8 \text{ Kg/cm}^2_a$), misurato al pozzo 83 in data 17.10.2011. L'analisi dei dati mostra che le pressioni risultano piuttosto uniformi in giacimento.

La fig. 12 riporta a titolo esemplificativo il confronto tra le misure di pressione rilevate dai profili statici, riportate al *datum*, e le registrazioni DPTT per il pozzo Minerbio 83.

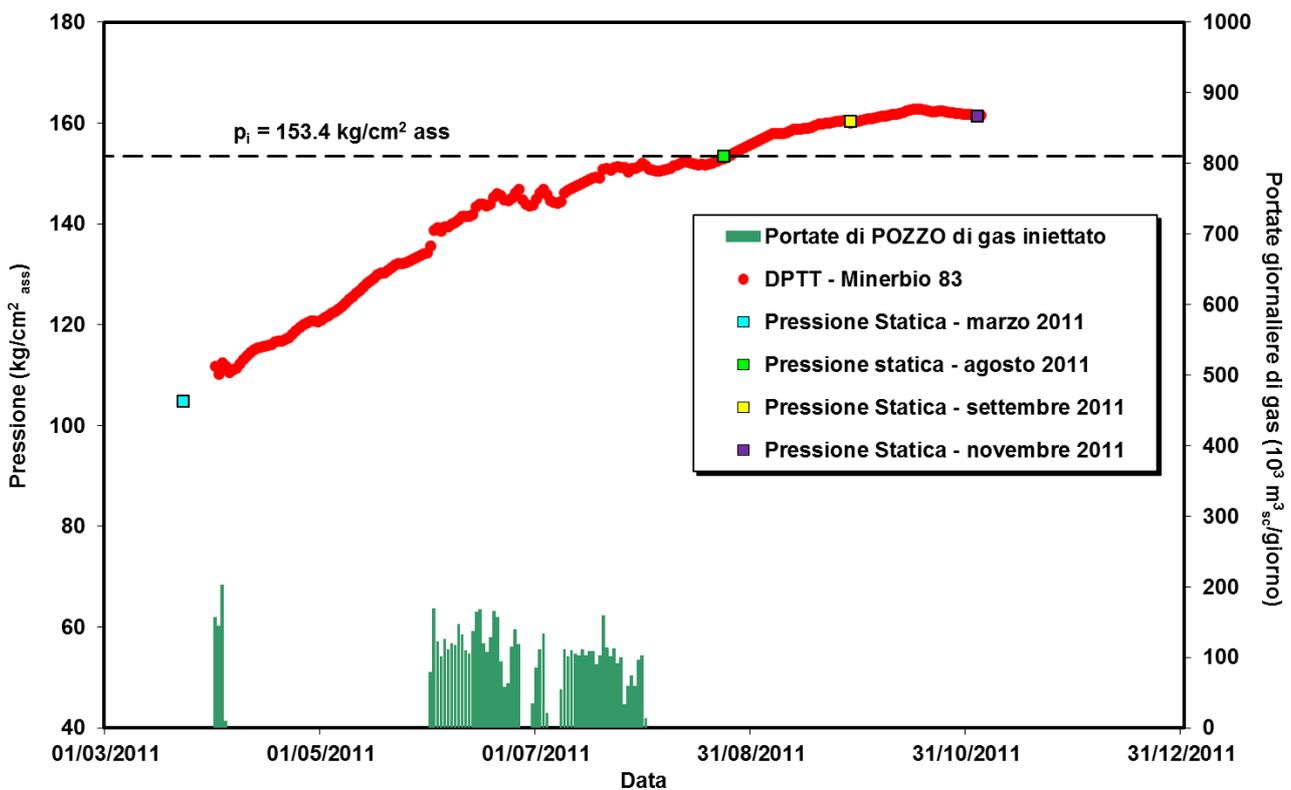


Fig. 12

Monitoraggio della saturazione in gas-acqua

Al fine di verificare le variazioni della saturazione in gas in corrispondenza del pozzo Minerbio 21, collocato sul fianco sud-occidentale della struttura, sono stati acquisiti, durante il ciclo sperimentale di iniezione, due log RST, rispettivamente a $P=P_i$ (25 agosto 2011) e in corrispondenza del massimo invaso (8 novembre 2011).

L'interpretazione eseguita è stata unicamente di tipo qualitativo e ha evidenziato variazioni minime tra le curve SIGMA delle due acquisizioni, tali da non permettere di

valutare significative differenze di saturazione in gas a seguito della campagna di iniezione.

Il dato acquisito si giustifica con la probabile risalita della tavola d'acqua, in quanto già all'atto della perforazione del pozzo (anno 1958), l'intervallo originariamente mineralizzato era rappresentato unicamente da pochi metri di sabbie nella parte sommitale del Pool C.

Monitoraggio movimenti del suolo

Nel campo di Minerbio viene eseguito fin dal 2003 un regolare monitoraggio dei movimenti del suolo attraverso l'analisi interferometrica dei dati Radarsat con la tecnica dei Permanent Scatterers. La metodologia utilizzata si basa sull'analisi di dati acquisiti ripetutamente nel tempo sulla medesima area di interesse, attraverso sensori radar satellitari che consentono l'individuazione di alcuni bersagli al suolo, denominati Permanent Scatterers (PS), su cui risultano possibili misure di spostamento molto accurate.

Le metodologie di analisi ed interpretazione dei dati sono descritte in dettaglio nel rapporto di Eni E&P - Interferometria differenziale SAR e Tecnica PS – Campo di stoccaggio di Minerbio (aggiornamento dati Agosto 2011).

L'interpretazione dei dati attualmente disponibili, riferiti al periodo ottobre 2003 – agosto 2011, evidenzia un leggero trend positivo dell'area occupata dal giacimento, con un innalzamento medio relativo di circa 1,2 mm/anno. Il valore è relativo al punto di riferimento utilizzato per l'analisi del dato, al quale viene assegnata per convenzione una velocità verticale pari a zero. Come riferimento in fase di processing è stato pertanto utilizzato un punto sufficientemente distante dalla zona di influenza del giacimento, in modo da poter apprezzare in maniera oggettiva eventuali anomalie deformative.

Le serie storiche dei punti selezionati all'interno del giacimento presentano un'elevata periodicità, con oscillazioni quantificabili tra 7,5 e 20 mm e con punti di massimo e minimo correlabili temporalmente con i picchi della curva di stoccaggio (fig. 13).

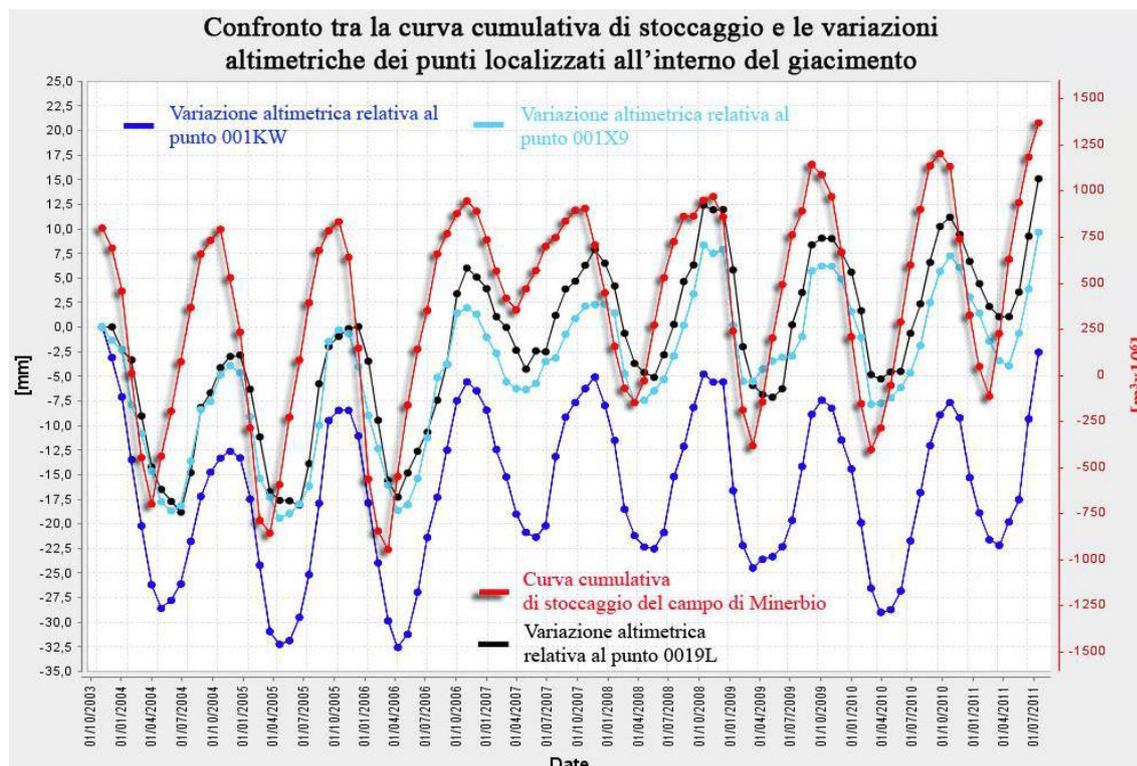


Fig. 13

Questo fenomeno, non riscontrato per i punti esterni ai limiti del campo e quindi non influenzati dall'attività di stoccaggio, indica un comportamento elastico dell'intero sistema giacimento-copertura. I principali risultati dell'analisi condotta evidenziano una sostanziale stabilità dell'area di studio.

Monitoraggio microsismico di superficie

La rete microsismica di Minerbio è stata installata nel 1979. Inizialmente la rete era composta da 7 stazioni, di cui 5 di superficie e 2 in pozzo a profondità di alcune centinaia di metri.

Successivamente le stazioni sono state ridotte a 3, eliminando quelle in pozzo e alcune di superficie, implementando la strumentazione delle stazioni di superficie con tecnologia moderna di tipo digitale e sismometri a tre componenti. La fig. 14 riporta l'ubicazione delle tre stazioni attualmente attive.

I dati acquisiti evidenziano come i sismi rilevati, esterni all'area del giacimento e molto più profondi dello stesso, siano tutti riconducibili alla sismicità naturale dell'area, riferibile all'attività tettonica delle vicine strutture appenniniche, escludendo ogni correlazione con l'attività di stoccaggio.



Fig. 14

Negli anni di operatività della rete sono stati registrati solo pochi eventi sismici naturali a carattere locale e nessun evento connesso all'attività di stoccaggio.

La fig. 15 mostra la localizzazione degli ipocentri dei sismi locali registrati con profondità inferiore a 10 km. La rete microsismica è tuttora operativa, data la valenza strategica del giacimento e l'esistenza di una sporadica attività sismica naturale.

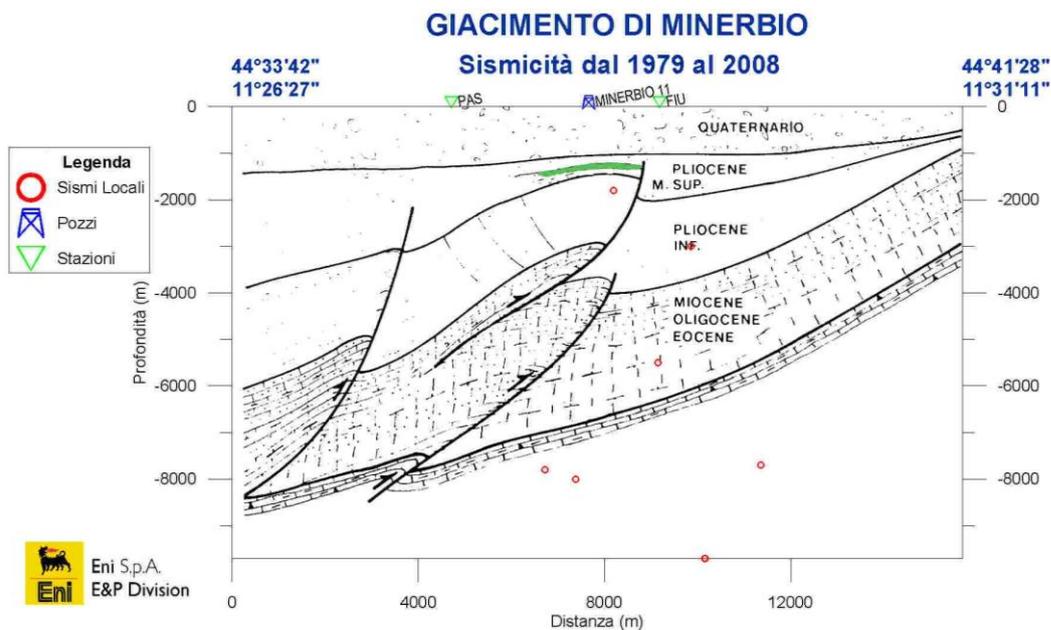


Fig. 15

Il monitoraggio in continuo dei valori di pressione del giacimento in pozzi opportunamente selezionati, con misurazioni effettuate sia a testa-pozzo che al fondo, rappresenta un ulteriore strumento di controllo per valutare eventuali anomalie nel regime idraulico complessivo del giacimento conseguenti ad eventi sismici naturali.

Nella fig. 16 si riporta a titolo di esempio il grafico relativo ad un'analisi eseguita a seguito di un sisma rilevato nella primavera del 2009 con epicentro nella zona di Forlì. Le curve che registrano l'andamento delle pressioni di giacimento correlate alle portate in iniezione durante la fase di ricostituzione non evidenziano alcuna anomalia (caduta repentina di pressione), a conferma della tenuta del sistema giacimento e della roccia di copertura

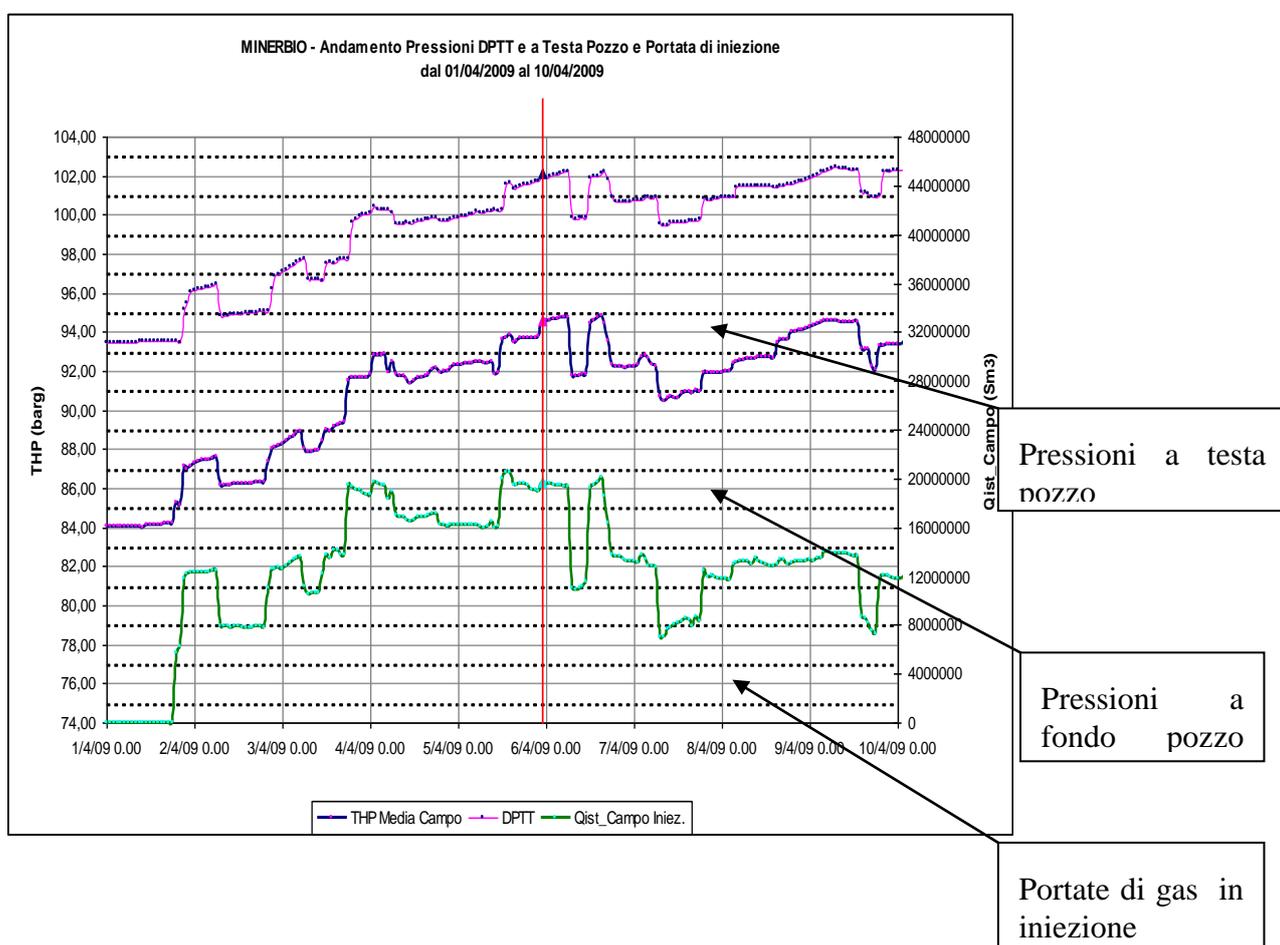


Fig. 16

La rete microsismica ha registrato anche i recenti terremoti di maggio 2012. Nella fig. 17 è riportata la schermata della registrazione acquisita dalle tre stazioni in occasione della scossa principale del 20 maggio 2012 ore 04.03 (ore 02:03 UTC) di magnitudo 5.9, il cui epicentro è localizzato a circa 30 km dal sito, mentre la profondità dell'ipocentro è di 6.3 km. Per ciascuna stazione sono riportate le tracce delle tre componenti rilevate dai sismometri (ch0: verticale; ch1 e ch2: orizzontali) ed i relativi valori di ampiezza espressi in m/s.

Osservando i dati, si nota che le componenti orizzontali mostrano valori di ampiezza maggiori rispetto a quelli verticali, effetto imputabile alla tipologia di onde sismiche: onde di compressione sulla verticale, onde “P, più veloci e onde di taglio sull'orizzontale, onde “S” . Delle tre stazioni, quella FIU, mostra la saturazione dei segnali in quanto tarata su una dinamica di ampiezza idonea alla rilevazione di anomalie sismiche a bassa magnitudo (magnitudo < 3); le altre due hanno una dinamica completa anche per ampiezze superiori a magnitudo > 3.

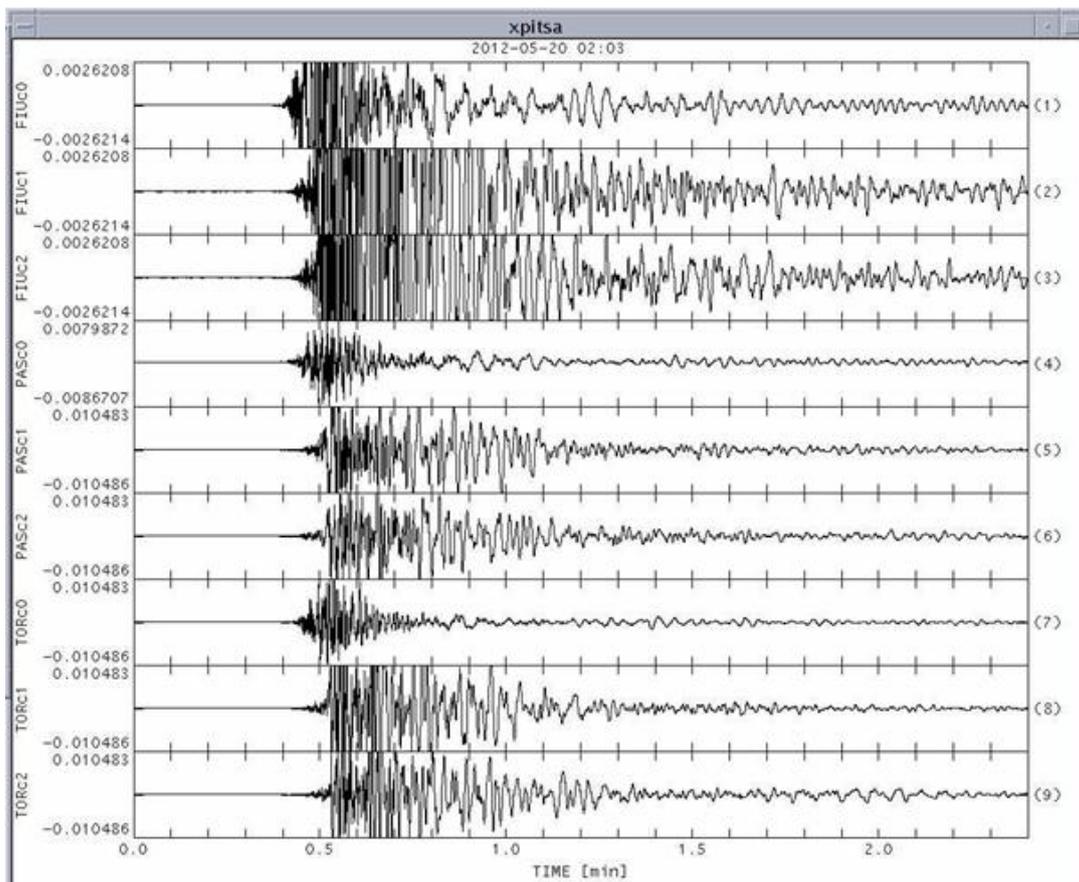


Fig. 17

Nella fig. 18 si riportano infine i valori di pressione e di portata misurati nel campo di Minerbio relativi ai giorni 19 e 20 maggio. Le curve che registrano l'andamento delle pressioni di giacimento correlate alle portate in iniezione durante la fase di

ricostituzione non evidenziano alcuna anomalia (caduta repentina di pressione), a conferma della tenuta del sistema giacimento e della roccia di copertura.

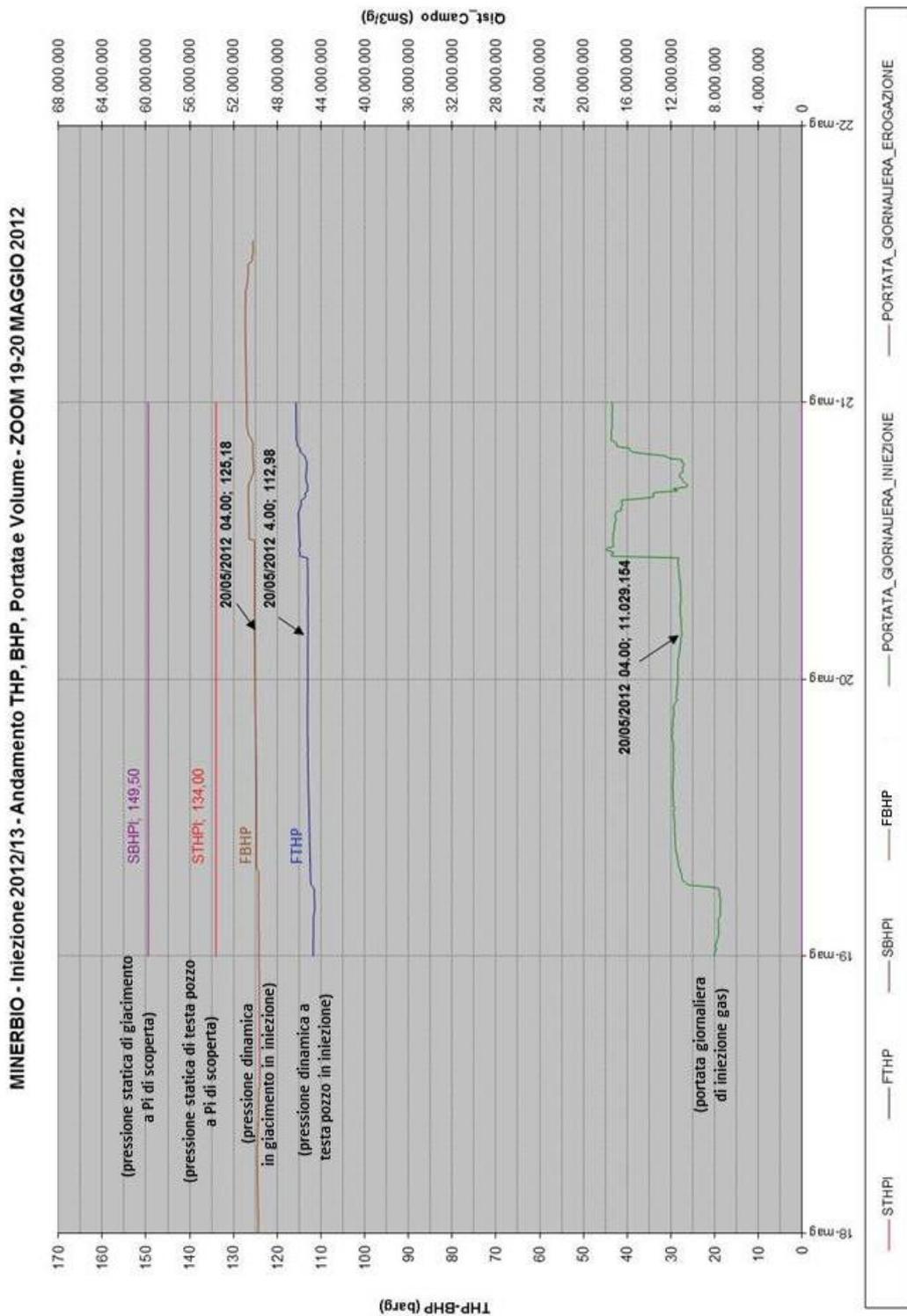


Fig. 18

A supporto della efficace risposta dei giacimenti di stoccaggio ai sismi naturali, vi sono le analisi dei dati geomeccanici ottenute con prove di laboratorio svolte su campioni delle argille del Santerno. Questi risultati hanno consentito di elaborare un nuovo modello statistico della compressibilità che descrive un terreno più rigido a basse profondità (inferiori a 250 m) e più deformabile elasticamente a profondità nell'ordine di 1200 e 1600 m, in cui sono collocati i giacimenti di stoccaggio dell'area padana.

Questo comportamento elastico è determinato, nel caso del giacimento di Minerbio, dalla presenza di formazioni argillose a tetto ed a letto del reservoir (rispettivamente le Argille del Santerno superiore e le Argille del Santerno inferiore), come riportato nella sezione geologica in fig. 19. Tali litologie infatti attenuano la propagazione delle onde sismiche.

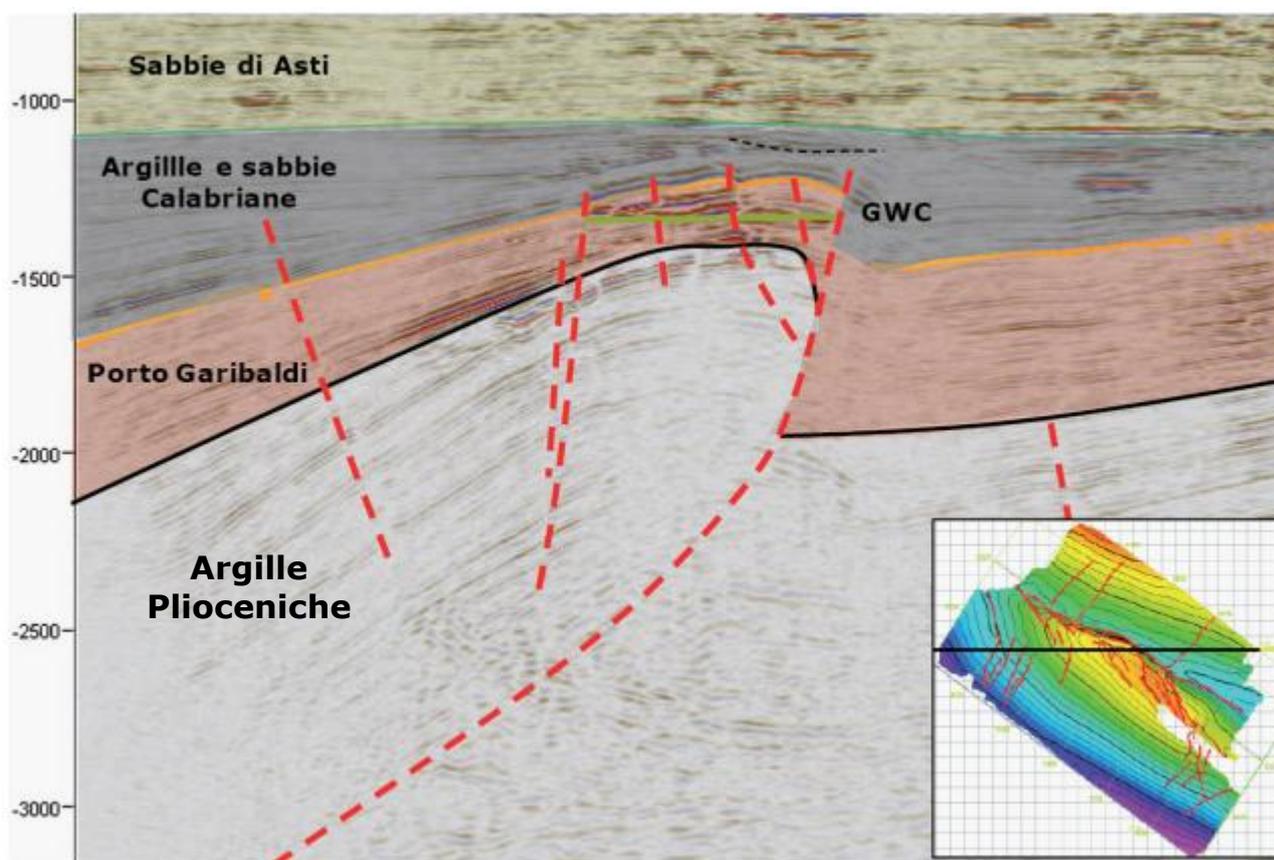


Fig. 19

14 - EVENTI SISMICI E TENUTA DEL GIACIMENTO

Con riferimento agli aspetti in grado di influenzare le condizioni di sicurezza dei giacimenti di stoccaggio in relazione alla sismicità naturale, si evidenziano alcuni

elementi propri dei giacimenti depletati utilizzati da Stogit, tra cui il giacimento di Minerbio.

Efficienza della trappola geologica

I giacimenti utilizzati in Italia per l'attività di stoccaggio sono il risultato di una complessa evoluzione geologica dei bacini sedimentari in cui sono inseriti, che ha permesso la formazione e la preservazione di accumuli di idrocarburi rimasti intrappolati nel sottosuolo per milioni di anni. Questa considerazione evidenzia la comprovata efficienza geologica delle trappole associate a questi giacimenti, che hanno superato indenni le complesse vicende legate agli eventi sismici e tettonici succedutisi in questo lungo arco di tempo.

Assetto strutturale

Tali giacimenti sono associati a contesti strutturali privi di faglie sismogenetiche, cioè in grado di generare terremoti. Le trappole che ospitano il gas sono infatti legate a semplici elementi stratigrafici (variazioni laterali di porosità dei sedimenti) o sono delimitati al margine delle strutture da faglie la cui attività sismica si è espletata solo nel lontano passato geologico, durante la generazione della trappola.

Argille di copertura e argille basali

I giacimenti utilizzati da Stogit sono caratterizzati dalla presenza al di sopra del reservoir di una formazione di copertura impermeabile di natura argillosa, che presenta spessori elevati (fino ad alcune centinaia di metri) ed è dotata di proprietà geomeccaniche che assicurano un comportamento di tipo elastico, comprovato sia dalle analisi eseguite in laboratorio su campioni di carote che dai monitoraggi tramite satellite relativi ai movimenti del suolo. Queste caratteristiche geomeccaniche inibiscono l'innescò di fenomeni di microfratturazione in grado di generare eventuali fughe di gas verso l'alto.

Anche alla base dei giacimenti è presente una formazione di tipo argilloso di elevato spessore, che contribuisce ulteriormente ad isolare dal punto di vista geodinamico la roccia-serbatoio utilizzata per lo stoccaggio del gas, preservandola anche da sollecitazioni legate ad eventi sismici generati in profondità.

Presenza di livelli a gas

La presenza di livelli porosi saturi in gas esercita un effetto di attenuazione di velocità e di propagazione dell'energia delle onde acustiche generate dai sismi naturali. Queste proprietà dei fluidi gassosi intrappolati nei sedimenti si evidenziano in particolare a seguito della registrazione di log geofisici denominati "Sonic Log". Queste misurazioni, che sono state eseguite in alcuni pozzi per acquisire informazioni sulle caratteristiche

geologiche dei livelli attraversati, si basano sull'emissione e sulla ricezione di onde acustiche ad opera di piccoli sensori appositamente calati in pozzo.

In particolare i Sonic Log misurano le velocità di transito delle onde acustiche attraverso una formazione geologica, condizionata da fattori quali litologia, grado di compattazione e di cementazione, tipologia dei fluidi interstiziali (acqua, gas). Nella fig. 20 è riportato uno schema stratigrafico semplificato dei giacimenti di stoccaggio della Pianura Padana, con una successione composta dalle seguenti formazioni (a partire dal basso): substrato carbonatico, argille basali, formazione porosa con acquifero, livello sabbioso utilizzato per lo stoccaggio del gas, formazione argillosa di copertura, livelli porosi superficiali. Per ogni unità stratigrafica sono riportate indicativamente le misure medie fornite dai Sonic Log, l'unità di misura utilizzata è solitamente espressa in una scala inversa alla velocità, cioè in $\mu\text{sec}/\text{ft}$ = microsecondi /piede. Si evidenzia come i livelli porosi utilizzati per lo stoccaggio del gas (colore verde) presentino valori di Sonic più elevati, che indicano tempi di transito delle onde acustiche inferiori sia rispetto ai livelli soprastanti che a quelli sottostanti del basamento.

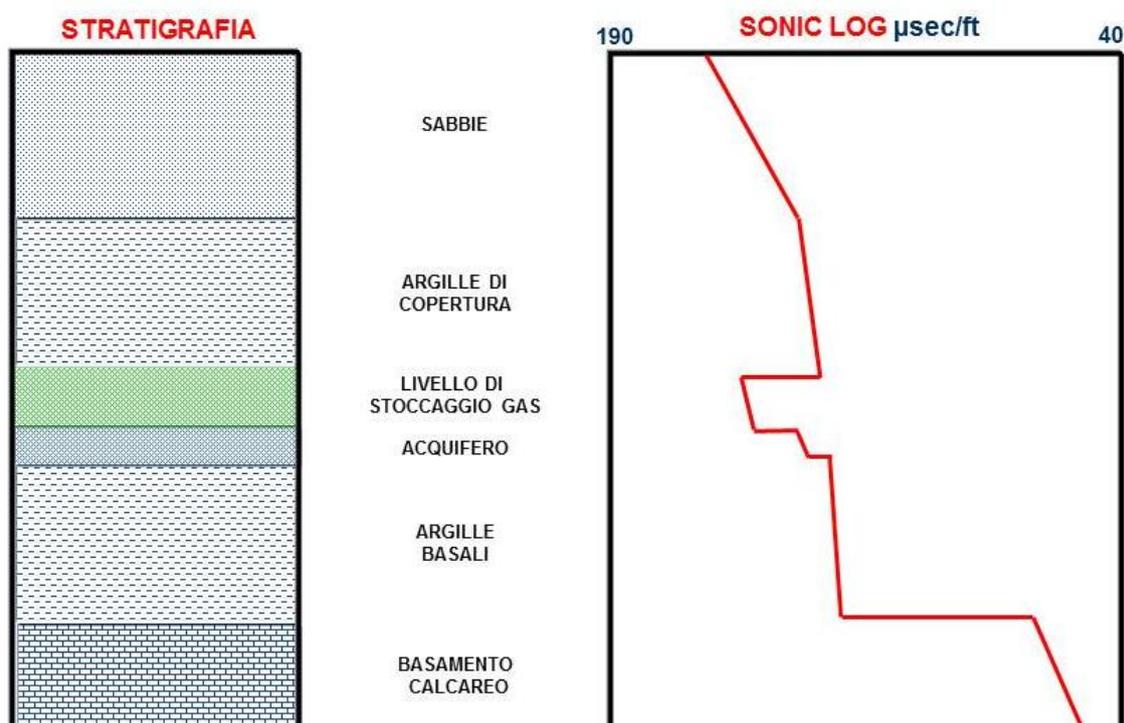


Fig. 20

A titolo esemplificativo, nelle figure seguenti sono riportati gli stralci di due Sonic Log acquisiti in pozzi di giacimenti nelle concessioni di stoccaggio di Settala (pozzo Merlino 4X dir, fig. 21) e di Alfonsine (pozzo Valle Dane 1, fig. 22). Dall'analisi dei log si nota

come in corrispondenza del livello sabbioso mineralizzato a gas (verde) si verifichi un marcato rallentamento delle onde acustiche, sia rispetto ai livelli argillosi che lo includono, generando un fenomeno di attenuazione dell'energia associata alle onde acustiche.

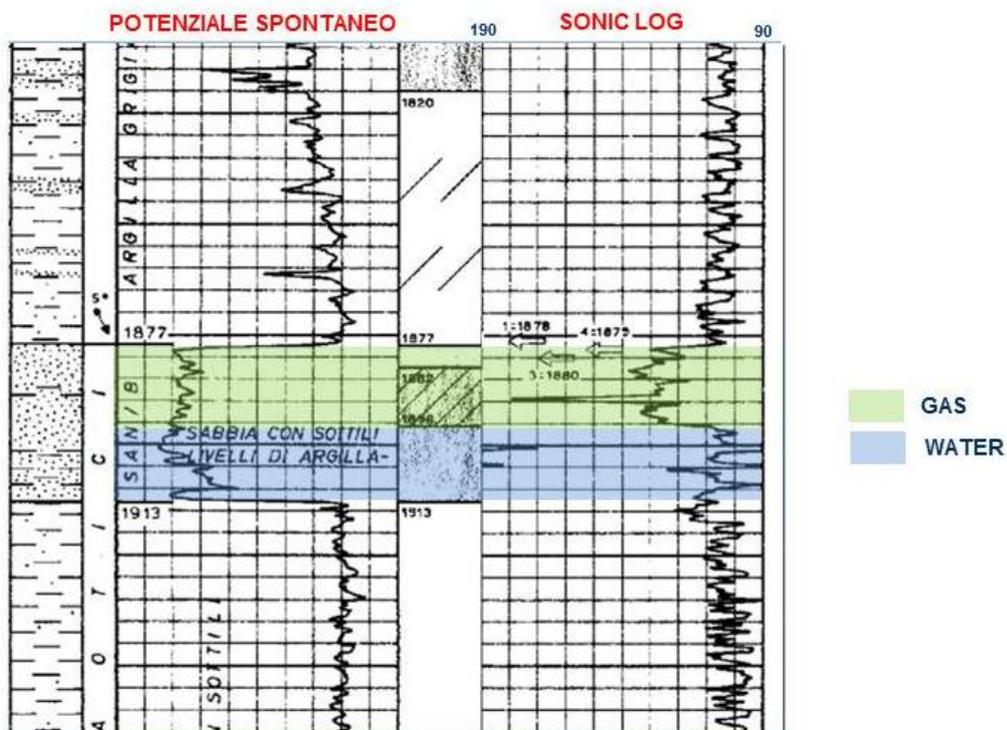


Fig. 21

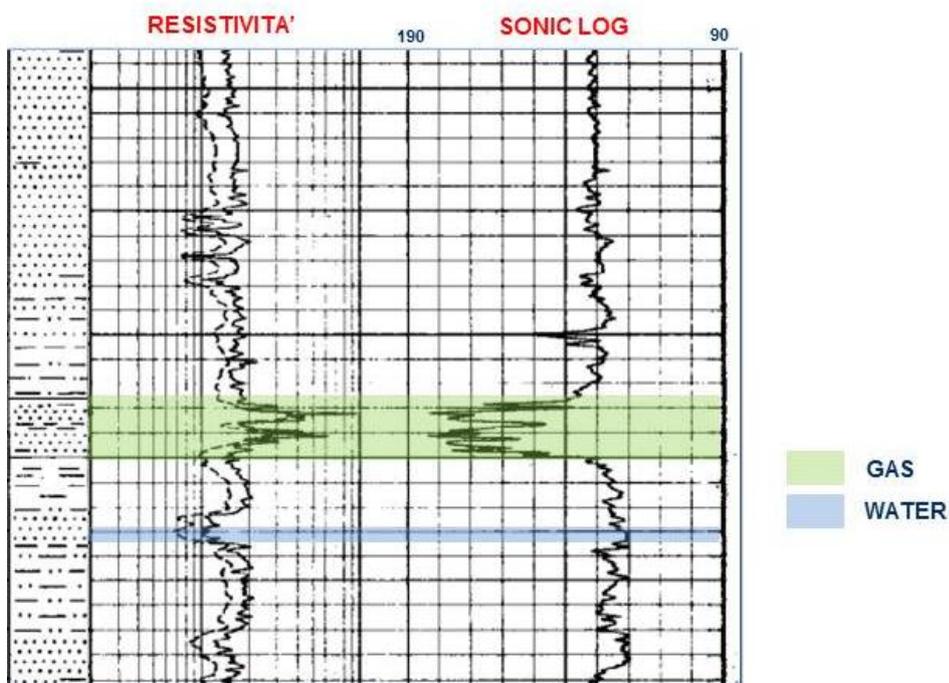


Fig. 22