



TITOLO

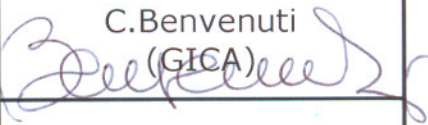
RIPALTA 63 DIR
CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEO-
STRUTTURALE E GEOMECCANICA
(STUDIO INTEGRATO)

DESTINATARI:

Stogit

CC:

DATA: 31/03/2008

3		
2		
1		
0	G.Gambacorta, A.Lyne, A.Mazzacca, F.Pampuri (GICA)	C.Benvenuti (GICA) 
	C.Barbieri (SPES), A.Pellegrino (TERA)	
REVISIONI	PREPARATO	APPROVATO

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 2 di 94
---	---	--	--------------

INDICE

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO

CAPITOLO 2: CONCLUSIONI

CAPITOLO 3: INTERPRETAZIONE LOG

- 3.1 Log disponibili
- 3.2 Interpretazione dei log di immagine
- 3.3 Interpretazione del log SonicScanner
- 3.4 Analisi petrofisica
- 3.5 Prove di sforzo mediante MDT Dual Packer

CAPITOLO 4: ANALISI DATI CAROTE

- 4.1 Descrizione sedimentologica
- 4.2 Descrizione della fratturazione
- 4.3 Threshold pressure
- 4.4 Geomeccanica

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 3 di 94
---	---	--	--------------

1. INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO

La scoperta del giacimento di Ripalta, ubicato in provincia di Cremona, avvenne durante le prime fasi di esplorazione per ricerca di idrocarburi nel sottosuolo padano. La struttura indagata, collocata al centro della pianura lombarda, è posta in prossimità della fascia di convergenza tra i fronti sepolti legati alla tettonica alpina e quelli, più recenti, di pertinenza appenninica. In particolare la genesi della struttura di Ripalta è da ricondurre alle ultime fasi di deformazione legate all'orogenesi alpina, come testimoniano l'orientazione verso meridione del fronte strutturale e l'età dei sedimenti coinvolti. La geometria del giacimento è determinata dall'interazione di fattori di tipo stratigrafico e strutturale. La mineralizzazione ad idrocarburi è associata alla presenza di corpi sedimentari porosi riferiti in massima parte al Messiniano (Miocene Superiore), rinvenuti a profondità di circa 1400 m. La chiusura idraulica del giacimento è assicurata da una trappola di tipo strutturale allungata in direzione est-ovest, delimitata a sud da un lineamento tettonico principale. La successione stratigrafica dei pozzi di Ripalta si presenta sostanzialmente analoga a quella attraversata in altre strutture del sottosuolo lombardo. La serie è costituita da sedimenti marini che documentano le ultime fasi del riempimento del bacino di avanfossa padano, ad opera di apporti detritici provenienti dallo smantellamento delle adiacenti catene alpina ed appenninica. I depositi più antichi del giacimento di Ripalta, attraversati solo nei pozzi più profondi, appartengono alla Formazione Gonfolite (Oligocene e Miocene Inferiore); essi sono costituiti da sedimenti di natura torbidityca in cui si intercalano litotipi sabbiosi, siltosi e argilloso-marnosi. A questa fase deposizionale seguì un prolungato periodo di emersione subaerea, che comportò lo smantellamento del substrato oligo-miocenico, evidenziato nella successione da una importante discontinuità di tipo erosionale e da un'ampia lacuna stratigrafica. La sedimentazione riprese nel corso del Messiniano, con prevalenti depositi deltizi, denominati Strati di Caviaga, comprendenti anche i livelli mineralizzati a gas. Si tratta di corpi di sabbie e ghiaie con subordinate intercalazioni argillose. Nel Pliocene Inferiore, a seguito di un rapido innalzamento del livello marino generalizzato in tutta l'area padana e mediterranea, la zona fu interessata dalla sedimentazione di una potente successione di natura argillosa (Argille del Santerno), con sporadiche intercalazioni di corpi sabbiosi canalizzati. Durante questo periodo la zona risentì in parte anche delle spinte compressive di origine appenninica, responsabili delle ultime fasi di strutturazione che comportarono la riattivazione o la parziale dislocazione dei lineamenti precedenti. La parte più recente della successione stratigrafica, di età pleistocenica, è costituita da litotipi prevalentemente sabbiosi. In questa serie, deponsi in un regime di blando basculamento tettonico, si individuano inferiormente depositi di natura torbidityca, relativi alla fase di maggior approfondimento del bacino; ad essi seguono verso l'alto corpi deltizi ad assetto progradante, con apporti sabbiosi e ghiaiosi che hanno determinato l'estinzione della sedimentazione marina e la formazione dell'attuale pianura alluvionale. I principali livelli mineralizzati del Campo di Ripalta sono racchiusi nell'intervallo stratigrafico di età messiniana appartenente alla Formazione Strati di Caviaga. In particolare si individuano due distinti orizzonti porosi, denominati Livelli A1 e A2, con differenti caratteristiche litologiche e

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 4 di 94
---	---	--	--------------

petrofisiche. I due livelli sono separati da un sottile orizzonte poco permeabile di natura argilloso-siltosa. Alla produzione primaria del giacimento hanno contribuito in qualche misura anche alcuni livelli sabbiosi di modesto spessore e con geometria lenticolare presenti nella soprastante serie pliocenica. Il Livello A1, posto nella parte superiore dell'intervallo produttivo, presenta uno spessore medio di 30-35 m; in gran parte dei pozzi questo livello evidenzia una ciclicità interna di natura sedimentaria ed una tendenza ad una maggiore sabbiosità nella parte superiore. Il sottostante Livello A2 è a sua volta ripartito in due orizzonti:

- il Livello A2 Superiore, che presenta uno spessore medio di 25 m, è costituito da una fitta alternanza di sedimenti a diversa granulometria;
- il Livello A2 Inferiore, il cui spessore è mediamente di 15-20 m, presenta caratteristiche migliori, essendo rappresentato in molti pozzi da litotipi prevalentemente sabbiosi.

Le attività programmate nella Concessione Ripalta Stoccaggio rientrano nell'ambito di un piano di potenziamento delle prestazioni del sistema stoccaggi, da realizzare attraverso una serie di interventi operativi che intendono garantire migliori prestazioni erogative. La realizzazione del pozzo Ripalta 63 Dir (il cui schema stratigrafico è mostrato in Fig. 1.1) presenta due principali obiettivi:

- il prelievo di carote di fondo e l'esecuzione di prove "in situ" (Leak Off Test, MDT), operazioni finalizzate soprattutto alla raccolta di dati per la caratterizzazione e la modellizzazione geomeccanica della formazione di copertura, e quindi alla valutazione della massima pressione di esercizio ammissibile per l'esercizio del giacimento;
- l'allestimento del pozzo con attrezzature idonee al successivo monitoraggio attraverso periodiche registrazioni dei valori di pressione di saturazione in gas/acqua, per la verifica del corretto esercizio del giacimento.

Per quanto riguarda il primo obiettivo, che è lo scopo del lavoro qui illustrato, l'analisi è stata affrontata attraverso l'integrazione di tutti i dati disponibili: log convenzionali e di immagine, log di risonanza magnetica, log acustici digitali di alta tecnologia, carote e relative misure di laboratorio.

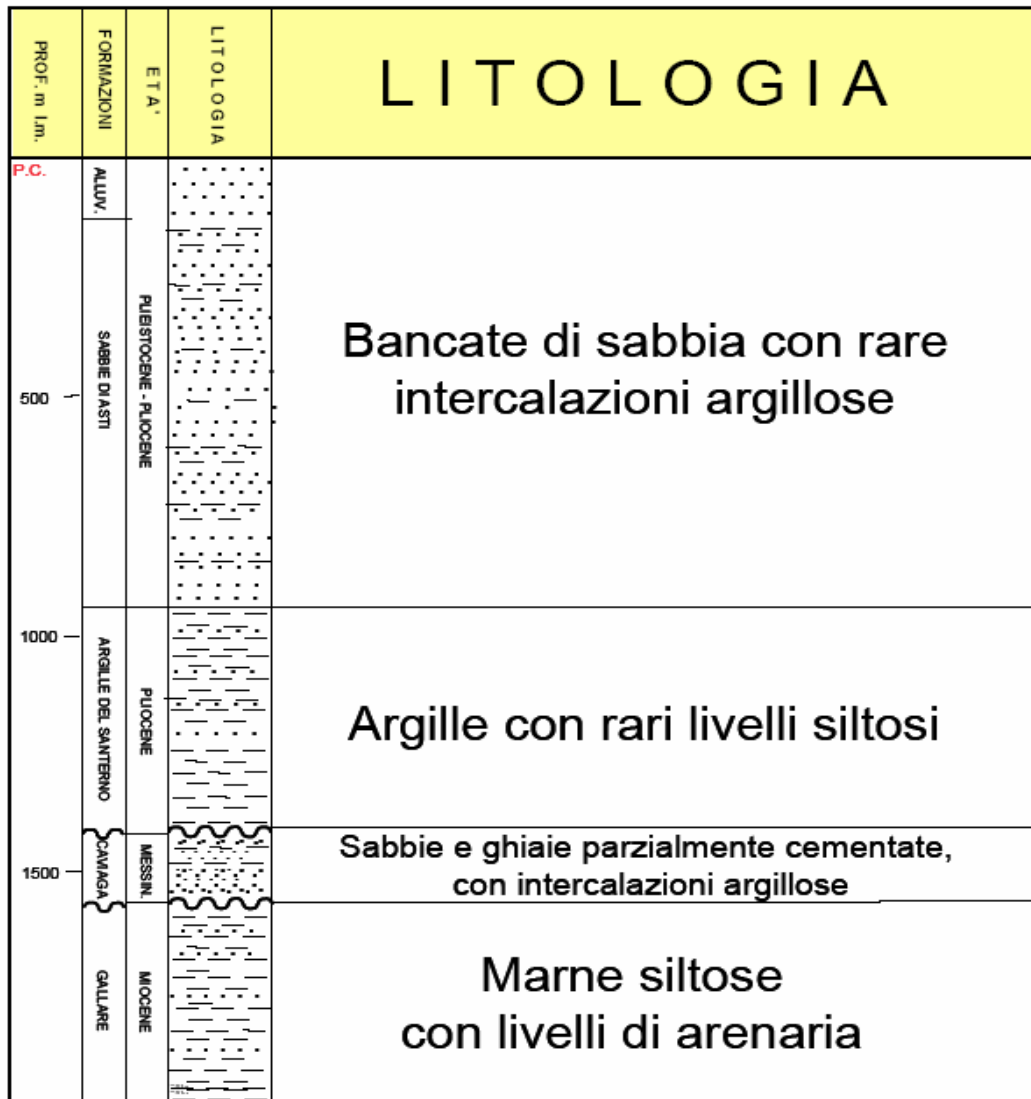


Fig.1.1 Schema stratigrafico

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 6 di 94
---	---	--	--------------

2. CONCLUSIONI

I principali risultati possono essere così riassunti:

- L'analisi dei log e la descrizione sedimentologica delle carote hanno permesso di distinguere un intervallo superiore prevalentemente argilloso, definito come "argille di copertura" (Argille del Santerno, 1440-1520 m MD) e un "intervallo inferiore" in cui livelli arenacei (da sottili fino a uno spessore massimo di circa 13 m) si alternano a livelli argillosi (Sabbie di Caviaga, 1520-1623 m MD).

- Le "argille di copertura" sono costituite da argilla talvolta marnosa con sottili intercalazioni di livelli arenacei, mostrano piani di stratificazione che immergono prevalentemente a ESE e basso angolo di inclinazione (in media 2°). La componente argillosa in senso mineralogico è intorno al 40%, la porosità effettiva è mediamente del 10% in accordo con i dati carota. La saturazione in acqua è prevalentemente di tipo irriducibile.

Dai log d'immagine non sono stati identificati né fenomeni di break-out né fratture indotte, pertanto non è stato possibile ottenere alcuna indicazione dello stress in situ. Sono state invece individuate 9 fratture naturali (di cui una di taglio) che mostrano un trend principale di fratturazione con direzione NNE-SSW.

L'analisi dell'anisotropia acustica dalle onde shear non evidenzia alcuna presenza di anisotropia. Il profilo di velocità delle onde shear e compressionali attorno al foro non evidenzia alcuna variazione da cui si deduce che non è presente alcuna alterazione.

Gli stress-test eseguiti con MDT, in tutti gli intervalli testati, non hanno prodotto fratturazione.

Dalle prove triassiali (2 serie di prove per un totale di 8 campioni) risulta che il modulo elastico e di taglio sono funzione decrescente della profondità e funzione crescente della pressione di confinamento usata. Il coefficiente di Poisson ha un andamento crescente con la profondità mentre sembra leggermente decrescere all'aumentare del confinamento. Per quel che riguarda i parametri di resistenza, si può dire che l'angolo di attrito sembra diminuire con la profondità mentre la coesione non mostra una tendenza definita.

Per quanto riguarda i valori di threshold pressure, nella serie di prove eseguite, le soglie di sfondamento variano tra 45 ad oltre 70 bar.

- L' "intervallo inferiore" comprende livelli arenacei (reservoir) costituiti da arenarie massive, con gradazione da medie a fini, e da sottili livelli di arenaria fine o molto fine. Sono presenti clasti prevalentemente carbonatici. Le arenarie molto fini mostrano spesso un "fining upward" verso livelli argillosi che si alternano a quelli arenacei. La stratificazione mostra le stesse caratteristiche di direzione e immersione delle argille di copertura.

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 7 di 94
---	---	--	--------------

Dal punto di vista petrofisico, l'intervallo reservoir principale (1570-1582.5 m) mostra una porosità effettiva media del 25%, in accordo con i valori da carota, e saturazioni medie in acqua intorno al 20%. La saturazione in acqua irriducibile da NMR è invece mediamente più bassa (circa 10%), indicando presenza di acqua libera. L'intervallo reservoir 1609-1613 m mostra analoga porosità ma una saturazione in acqua tra il 60 e l'80%. Il confronto con la saturazione in acqua irriducibile da NMR evidenzia presenza di acqua libera.

Come per la copertura, non sono stati identificati fenomeni di break-out o fratture indotte da log d'immagine. Sono state riconosciute 4 fratture naturali (di cui una di taglio), che non evidenziano un'orientazione dominante, e una faglia a circa 1549 m.

L'analisi dell'anisotropia acustica evidenzia una zona di anisotropia nell'intervallo delle sabbie a gas con valori compresi tra il 4 e l'8% e con un fast shear azimuth con andamento NE. In queste sabbie si è evidenziata anche una variazione del profilo di velocità attorno al foro indicando una presenza di alterazione che si spinge fino a 6" all'interno della formazione. La permeabilità ricavata dall'onda Stoneley nel reservoir mostra andamento e valore simile a quello delle carote (600-700 mD) ed alla permeabilità ricavata dai dati NMR.

I test MDT hanno prodotto fratturazione in un unico punto, nell'intervallo 1588-1589 m, in corrispondenza di una frattura naturale preesistente (osservabile anche da carota) riaperta dal test eseguito. Dalle prove triassiali (1 serie di prove per un totale di 4 campioni) risulta che il modulo elastico e di taglio, come per le argille di copertura, sono funzione crescente della pressione di confinamento usata. Il coefficiente di Poisson sembra leggermente decrescere all'aumentare del confinamento. Per quel che riguarda i parametri di resistenza, considerando le difficoltà legate a quest'insieme di prove ("intervallo inferiore"), l'angolo di attrito sembra diminuire con la profondità mentre la coesione non mostra una tendenza definita.

Come per le argille di copertura, nelle prove eseguite per la determinazione della threshold pressure, la soglia di sfondamento è maggiore o uguale a 65 bar.

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 8 di 94
---	---	--	--------------

3. INTERPRETAZIONE LOG

3.1 Log disponibili

Nel pozzo Ripalta 63 Dir sono stati acquisiti i seguenti log open hole:

- fase 12 ¼"

AIT-GPIT-PPC-MSIP-GR-ACTS

- fase 8 1/2"

FMI-GR-ACTS (pre test)
UBI-GPIT-GR-ACTS
MDT-GR (Dual Pkr)
STAR-GR-TTRM (pre test e post test)
CBIL-GR-TTRM (pre test e post test)
RCI-GR-TTRM (Dual Pkr)
AIT-GPIT-PPC-MSIP-GR-ACTS
FMI-TLD-APS-GR-ACTS (pre test)
UBI-GPIT-GR-ACTS
CMR-GR-ACTS
MDT-GR (Dual Pkr)
FMI-GR-ACTS (post test)

Il pozzo Ripalta 63 Dir è verticale nella parte superiore poi è deviato nella parte centrale (828 m) con inclinazione di circa 26° e con azimuth di circa 309°N (vedi allegato A) per poi rientrare in verticale in corrispondenza della zona obiettivo (Sabbie di Caviaga).

L'acquisizione dei log copre gran parte della F.ne Porto Garibaldi, le F.ni Argille del Santerno e Sabbie di Caviaga.


Il foro è stato perforato con l'utilizzo di un fango FW-FlexDrill/Avapolyoil-KCl. Le caratteristiche del fango nella fase 12.25" sono: densità 1200-1400 g/l, viscosità 53 sec/l, Cl⁻ 17 g/l, Ca⁺⁺ 40 mg/l, Mg⁺⁺ 24 mg/l, K⁺ 43 mg/l, Solid 12.5%, pH 10.7; nella fase 8.5" sono: densità 1340-1400 g/l, viscosità 54 sec/l, Cl⁻ 14 g/l, NaCl 16 g/l, K⁺ 32 mg/l, Solid 12%, pH 10.5.

Per quanto riguarda le prove di sforzo, queste sono state realizzate mediante MDT Dual Packer ed hanno dato esito positivo unicamente alla profondità di 1588.5 m.

3.2 Interpretazione dei log d'immagine

3.2.1 Controllo di qualità

Nel pozzo Ripalta 63 Dir i log d'immagine sono stati registrati nella sola fase 8" ½ nei seguenti intervalli:

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 9 di 94
---	---	--	--------------

- 1375-1503 m FMI "before stress test phase 1"
- 1370-1503 m UBI "before stress test phase 1"

STRESS TEST PHASE 1

- 1441-1501 m STAR "before stress test phase 2"

STRESS TEST PHASE 2

- 1441-1501 m STAR "after stress test phase 2"
- 1430- 1626 m FMI "before stress test phase 3"
- 1430-1623 m UBI "before stress test phase 3"

STRESS TEST PHASE 3

- 1430-1620 FMI "after stress test phase 3"

Prima del processing si è compiuto un dettagliato controllo dei log d'immagine (pre e post le prove di stress) con lo scopo di verificare la corretta acquisizione dei dati e la fedeltà dei log. Il controllo di qualità dei log di immagine si effettua sulle seguenti curve: caliper e curve di orientazione registrate dal GPIT.

Caliper

I caliper dei log FMI nella fase da 8" ½ sono di buona qualità mostrando sempre una buona sovrapposizione con il dato caliper del Tool di densità.

Il foro risulta prevalentemente "in gauge" ad eccezione di alcuni livelli da decimetrici a metrici in cui i caliper registrano la presenza di evidenti fenomeni di washout con scavarnamenti del foro fino a 2 pollici in diametro (Fig. 3.2.1). Tale irregolarità del foro inficia pesantemente la qualità del dato nei log di immagine e negli altri log a pattino. Questo effetto del foro viene risentito anche dai log di resistività profonda.

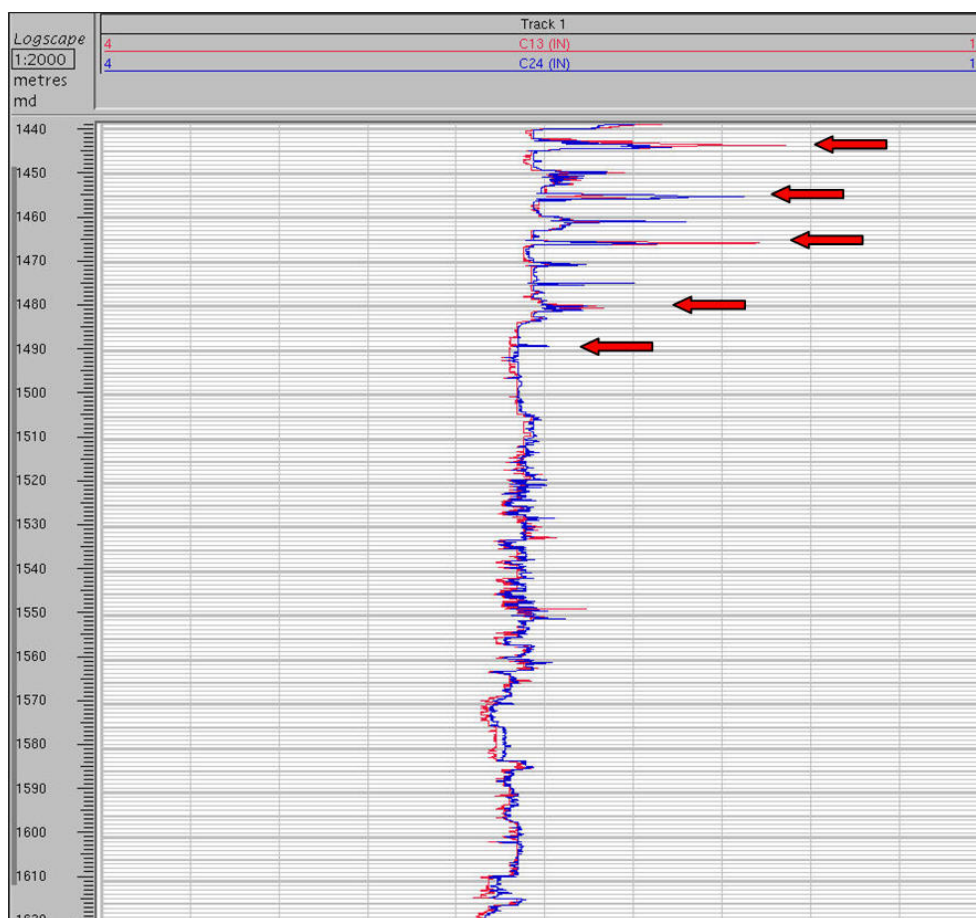


Fig. 3.2.1 – Curve caliper relative all’FMI “after stress test 3”. Con le frecce vengono evidenziati alcuni dei livelli in cui la qualità del foro diminuisce a causa di un evidente scavamento.

Curve di orientazione

In fase di controllo di qualità delle 3 registrazioni FMI, 2 UBI e 2 STAR, è stata verificata mediante cross-plot la centratura delle componenti accelerometriche e magnetometriche (Figg. 3.2.2a, 3.2.2b, 3.2.3, 3.2.4, 3.2.5, 3.2.6) della cartuccia di orientazione GPIT per la misura delle curve di navigazione. Inoltre le misurazioni dei valori di intensità ed inclinazione del campo magnetico terrestre e della forza di gravità acquisite dalla cartuccia GPIT sono risultate coerenti con i valori teorici, stimabili sulla base della posizione del pozzo.

Tramite il controllo di qualità del dato le eventuali scalibrature dello strumento riscontrate sono state corrette al fine di ridurre al minimo l’errore di misura.

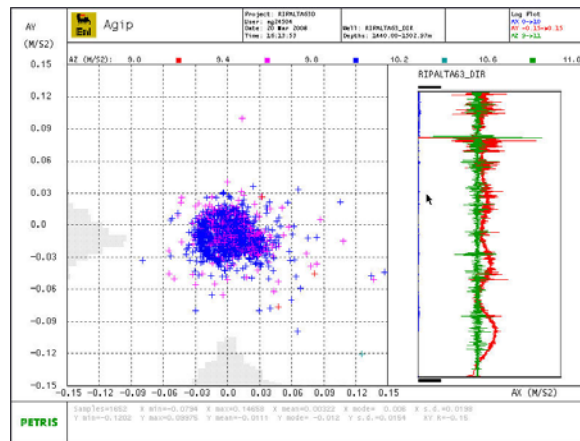


Fig. 3.2.2a – Cross-plot delle componenti accelerometriche prima della ricalibrazione.

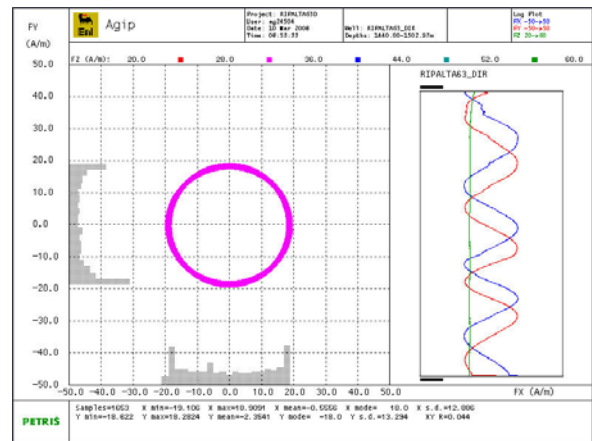
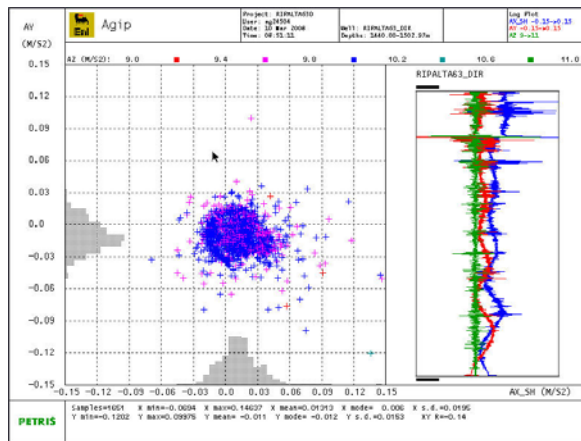


Fig. 3.2.2b – Cross-plot delle componenti accelerometriche e magnetometriche dell'acquisizione FMI "before stress test 1" dopo la ricalibrazione ($AX_{new} = AX + 0.01 \text{ m/s}^2$).

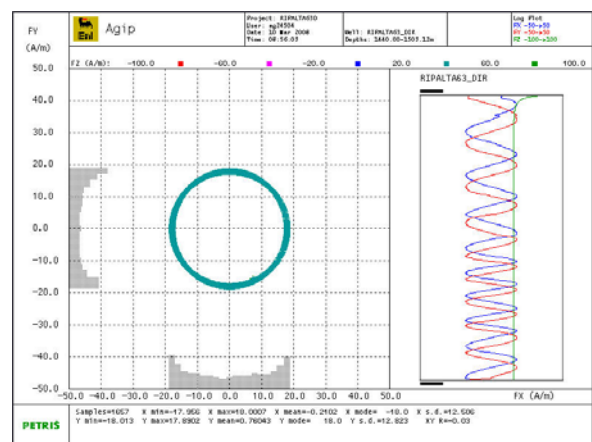
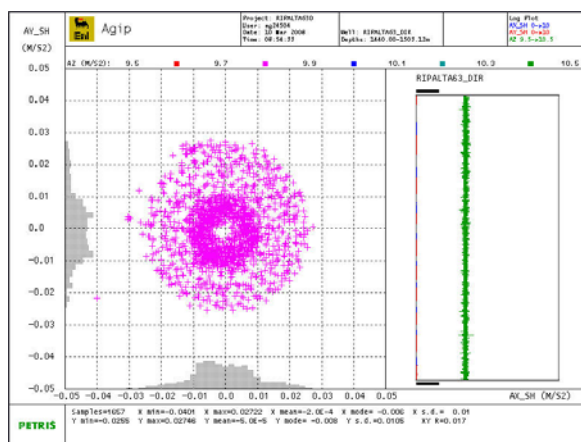


Fig. 3.2.3 – Cross-plot delle componenti accelerometriche e magnetometriche dell'acquisizione UBI "before stress test 1" dopo la ricalibrazione.

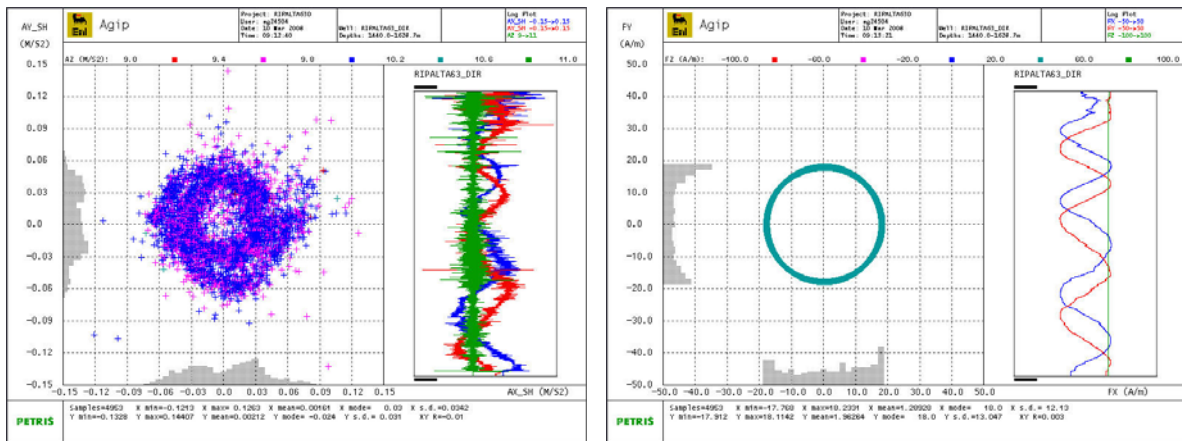


Fig. 3.2.4 – Cross-plot delle componenti accelerometriche e magnetometriche dell'acquisizione FMI "before stress test 3" dopo la ricalibrazione.

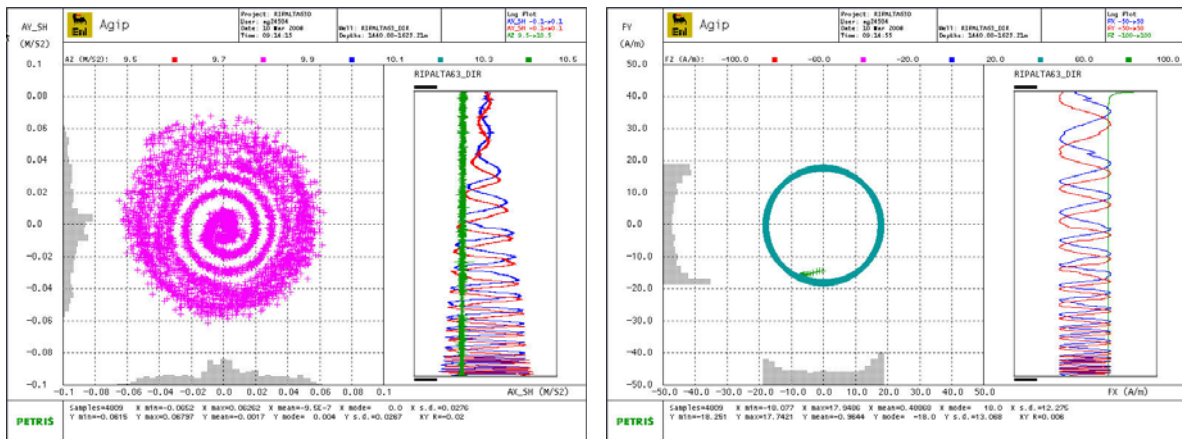


Fig. 3.2.5 – Cross-plot delle componenti accelerometriche e magnetometriche dell'acquisizione UBI "before stress test 3" dopo la ricalibrazione.

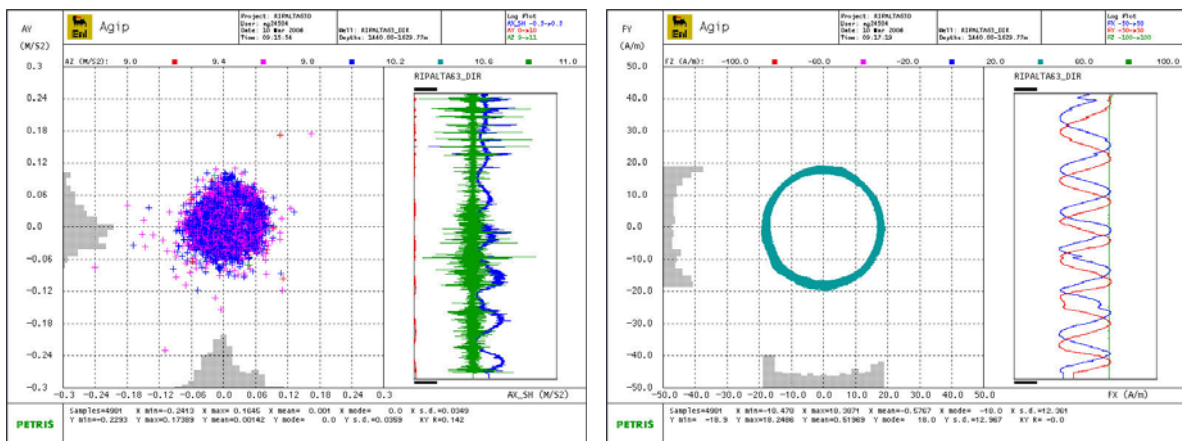


Fig. 3.2.6 – Cross-plot delle componenti accelerometriche e magnetometriche dell'acquisizione FMI "after stress test 3" dopo la ricalibrazione.

Il processing delle immagini è stato eseguito da GICA utilizzando la piattaforma 'Recall' di Petris. Le immagini elettriche ricavate dalle acquisizioni log FMI e STAR e quelle soniche ricavate dalle acquisizioni UBI prima e dopo le prove di stress sono di buona qualità, ad eccezione di alcuni intervalli della porzione argillosa dove il foro si presenta scavernato.

Per ottenere la giacitura degli eventi osservabili sulle immagini FMI, UBI e STAR sia di carattere stratigrafico che relativi alla fratturazione, è stato realizzato un picking di tipo manuale adottando il seguente schema classificativo:

<i>bed boundary:</i>	superficie di strato che rappresenta l'interfaccia tra due diversi fabric – indica la pendenza strutturale della serie;
<i>laminae:</i>	superficie discreta planare all'interno di uno stesso fabric – tale superficie è interpretabile come derivante da processi sedimentari;
<i>cross bedding:</i>	successioni di strati inclinati rispetto a superfici di strato principali. Tipici esempi sono i depositi di spiaggia e i depositi di duna eolica;
<i>fracture:</i>	superficie lungo la quale si verifica una perdita di coesione tra due blocchi – riconducibile a processi tettonici, eventualmente allargata da dissoluzione con riempimento di materiale argilloso;
<i>shear_fracture:</i>	frattura caratterizzata da un'evidenza di spostamento;
<i>fault:</i>	la faglia è una frattura (planare o non planare) della roccia che mostra evidenze importanti di movimento relativo tra le due masse rocciose da essa divise. La superficie lungo cui si è verificata la frattura si chiama superficie di faglia oppure piano di faglia;
<i>other:</i>	superfici non riconducibili ad un evento sopramenzionato o difficilmente interpretabile.

Inoltre, dato che la quasi totalità degli eventi sedimentari (*bed boundary* e *laminae*) sono orizzontali o sub-orizzontali è stato realizzato un picking automatico al fine di riconoscere l'orientazione media di questi livelli.

I dip computati sono stati ottenuti usando i seguenti parametri:

- una finestra di correlazione lunga 0.5 m
- un passo di correlazione pari a 0.05 m
- un angolo di ricerca (*search angle*) di 60°

Di tutti gli eventi ottenuti dal processing automatico sono stati considerati parte del solo segnale stratigrafico esclusivamente quelli con una pendenza inferiore ai 10°.

3.2.2 Analisi della stratigrafia e assetto strutturale

Il sondaggio ha interessato una successione stratigrafica che vede da prima la Formazione "Argille del Santerno" ricoprire i corpi prevalentemente sabbiosi ascriviti alla Formazione "Sabbie di Caviaga", a loro volta in contatto discordante sulle sottostanti "Marne di Gallare" non intaccate però dal pozzo in questione.

In particolare le Argille del Santerno (961-1520 m MD) mostrano una tessitura essenzialmente omogenea e sono caratterizzate dalla presenza di argille marnose/marne a banchi con spessori metrici, generalmente massive e solo localmente intercalate da livelli decimetrici siltoso-sabbiosi laminati (Fig. 3.2.7). Alla profondità 1520 m MD le immagini evidenziano un graduale cambio tessiturale che mette in luce il passaggio alla sottostante formazione reservoir, le Sabbie di Caviaga (Fig. 3.2.8). All'interno di questa formazione, l'analisi delle immagini di resistività combinata con il dato da carota ha messo in luce la presenza di livelli a sabbie intercalati a spessi strati marnosi con rari livelli di ghiaie (con spessore minore ai 5 m) il più delle volte a matrice sostenuta (pebbly mudstone) e tessitura caotica (Fig. 3.2.9).

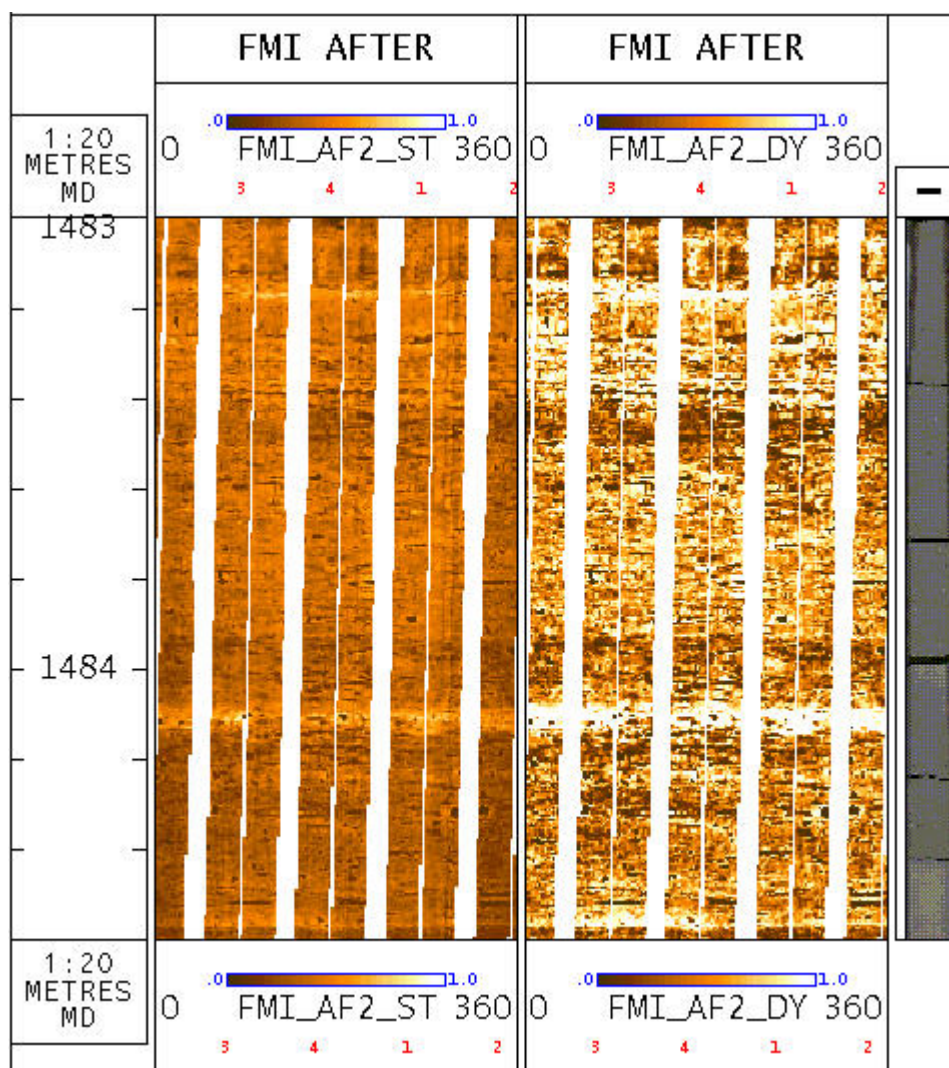


Fig. 3.2.7 – Immagini resistive (statica e dinamica) dell’FMI “after stress test phase 3” di una porzione delle Argille del Santerno nell’intervallo 1483.0-1484.6 m MD. Sulla destra delle immagini è riportata anche la foto della carota alla quota corrispondente.

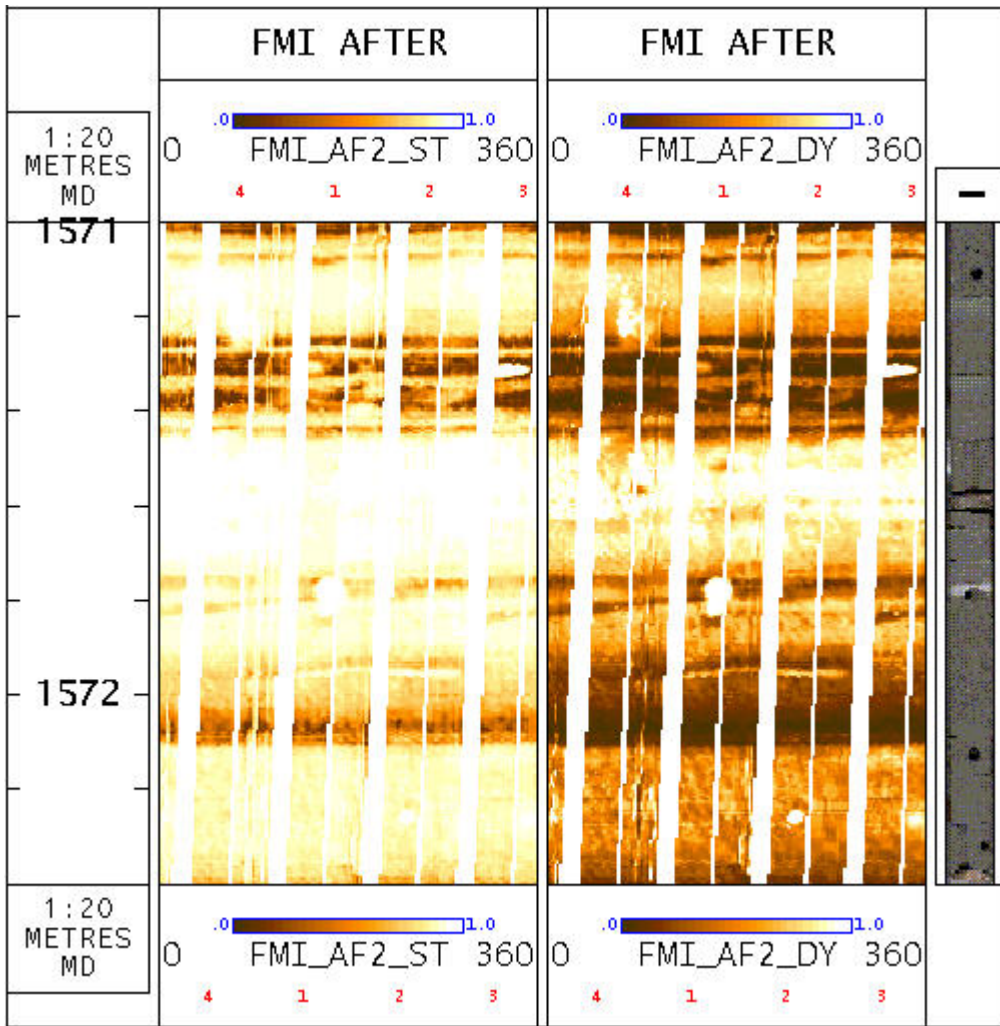


Fig. 3.2.8 – Immagini resistive (statica e dinamica) dell’FMI “after stress test phase 3” di una porzione delle Sabbie di Caviaga nell’intervallo 1571.0-1572.4 m MD. Nelle immagini si può vedere, grazie alla differente conduttività dei vari livelli, un esempio di intervallo caratterizzato dall’alternanza di livelli sabbiosi/siltosi (più resistivi) e livelli marnosi (più conduttivi). Sulla destra delle immagini è riportata anche la foto della carota alla quota corrispondente.

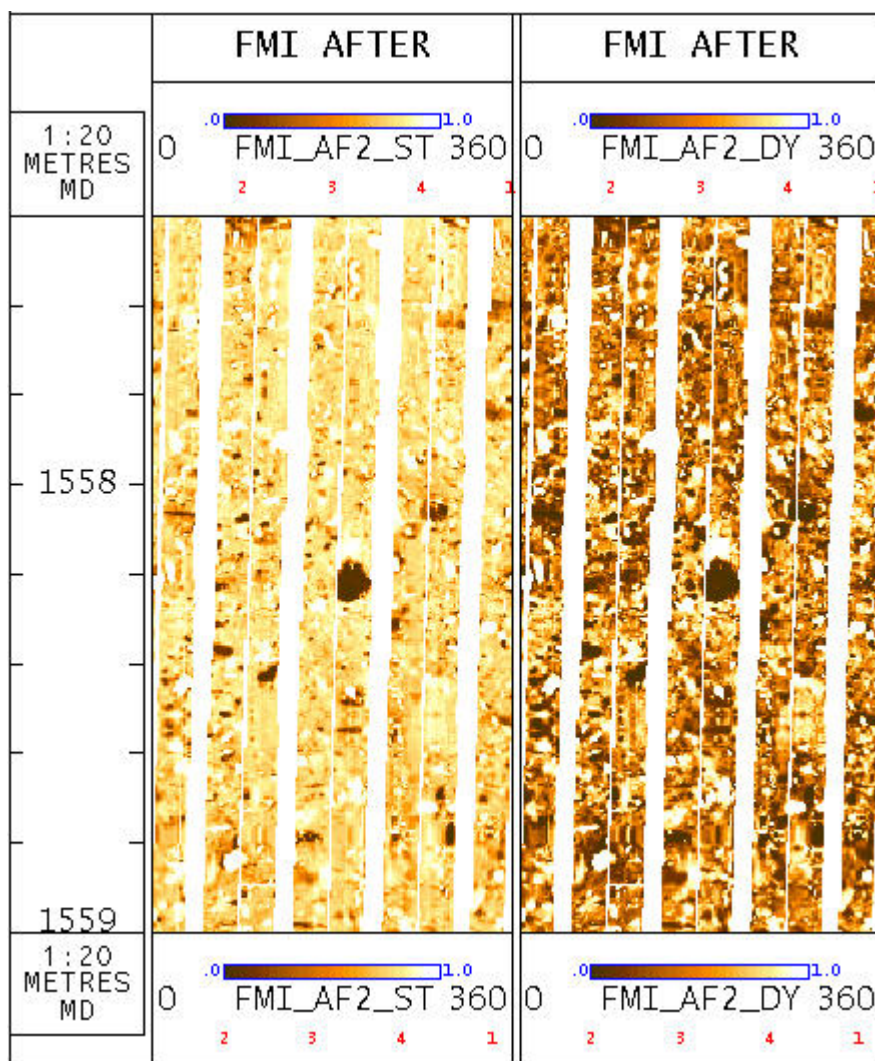


Fig. 3.2.9 – Immagini resistive (statica e dinamica) dell’FMI “after stress test phase 3” di una porzione delle Sabbie di Caviaga nell’intervallo 1557.4-1559.0 m MD. Nelle immagini si può vedere un esempio di intervallo a pebbly mudstone in cui i clasti vengono evidenziati dalla loro maggiore resistività rispetto alla matrice circostante.

In generale le pendenze strutturali sono state individuate grazie al riconoscimento sulle immagini delle superfici di stratificazione (*bed boundary* e *laminae*). La determinazione della pendenza strutturale media a scala di pozzo identificata mediante il processing automatico ha evidenziato una stratificazione regolare con piani che immergono prevalentemente verso ESE (circa 250°) con inclinazioni estremamente basse (in media 2°), comuni sia alle Argille del Santerno che alle Sabbie di Caviaga. La bassa pendenza dei livelli indagati suggerisce l’assenza di effetti evidenti di tilting tettonico (Fig. 3.2.10).

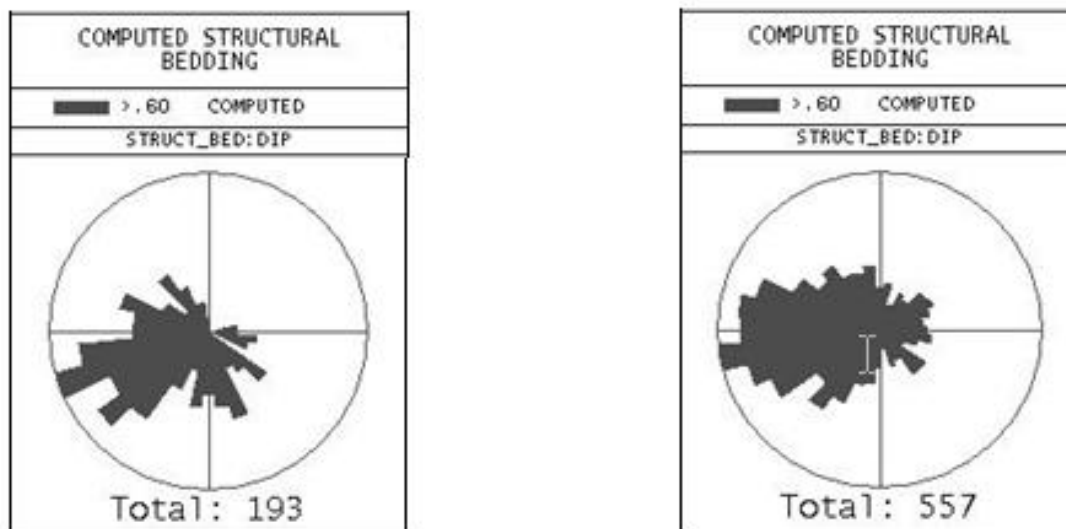


Fig. 3.2.10 – Diagramma a rosa per le superfici $<10^\circ$ ottenute dal picking automatico all'interno delle due formazioni incontrate dal sondaggio corrispondenti a superfici di bed boundary e laminae: Argille del Santerno a), Sabbie di Caviaga b).

La planarità dei livelli indagati dai log di immagine si perde principalmente nelle facies ghiaiose/pebbly mudstone dove sono visibili superfici deposizionali ad alto angolo (con pendenze fino a 60°). Questi livelli il più delle volte caotici sono ricchi in frustoli vegetali carboniosi e clay chips (Fig. 3.2.11).

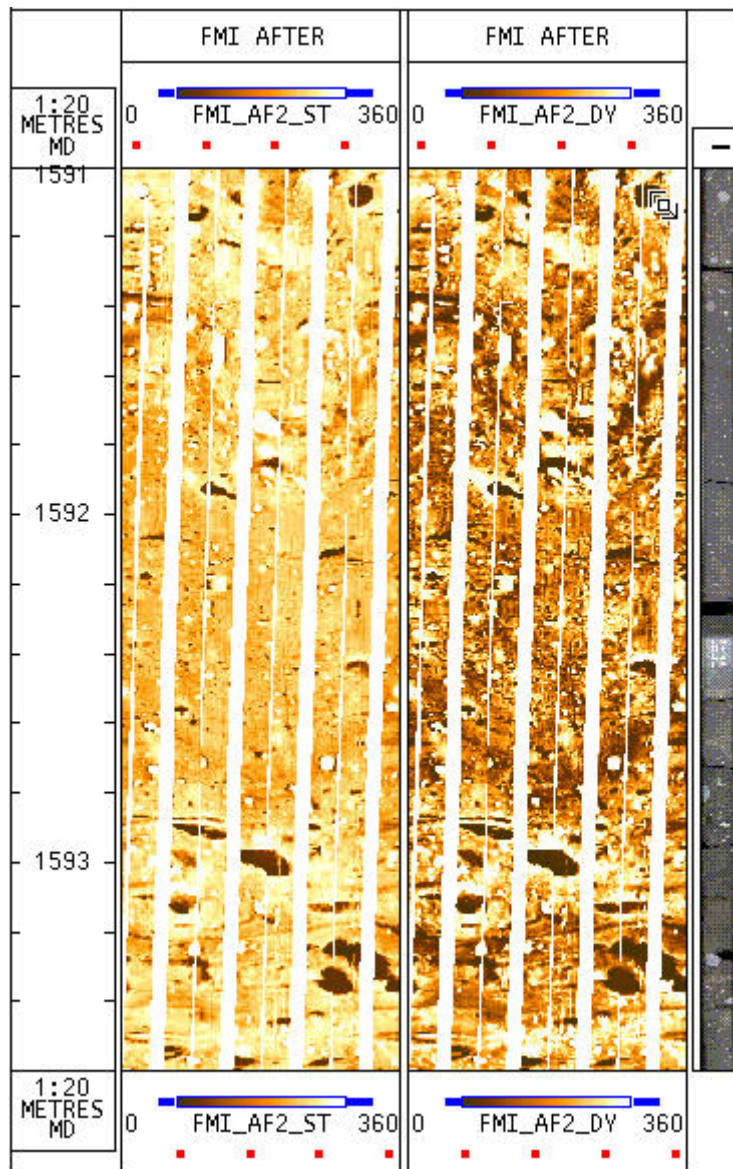


Fig. 3.2.11 – Immagini resistive (statica e dinamica) dell’FMI “after stress test phase 3” di una porzione delle Sabbie di Caviaga nell’intervallo 1591.0-1593.6 m MD. Nelle immagini si può vedere un esempio di intervallo a pebbly mudstone in cui è evidente la caoticità interna; si possono osservare particolarmente nella parte bassa numerosi clay chips evidenziati dalla loro maggiore conduttività. Sulla destra delle immagini è riportata anche la foto della carota alla quota corrispondente.

I livelli da decimetrici a metrici caratterizzati da un forte scavramento, già citati precedentemente nella parte relativa al controllo di qualità dei caliper, sono stati analizzati con maggiore attenzione durante l’osservazione dei log di immagine e delle carote. Tale fenomeno non è associato né all’attività di perforazione (fango, scalpello,...) né a variazioni sedimentologiche o composizionali della formazione. Ciò potrebbe piuttosto essere connesso ad anisotropie interne del corpo argilloso dovute a fenomeni diagenetici differenziali. A favore di questa ipotesi vi è la presenza riscontrata direttamente su carota di numerose superfici stilolitiche all’interno della formazione argillosa (alla profondità di circa 1489 m MD) e di sottili layer orizzontali più o meno cementati

probabilmente interpretabili come differenze pellicolari di diagenesi all'interno del corpo argilloso. Tali sottili livelli si distaccerebbero in conseguenza del loro differente comportamento reologico dalla parete del foro causando dei forti scavernamenti di spessore centimetrico, come evidenziati per altro dai picchi più evidenti del caliper all'interno delle zone scavernate (Figg. 3.2.12, 3.2.13).

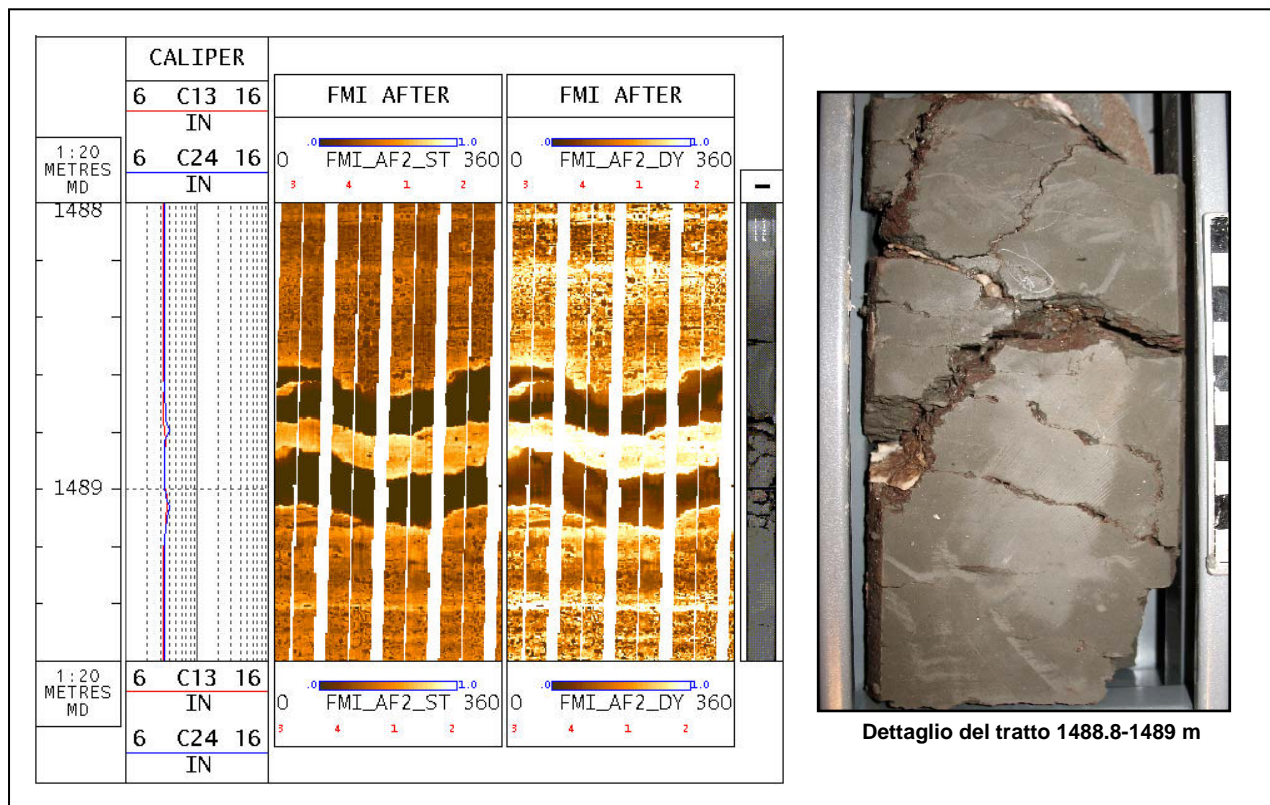


Fig. 3.2.12 – Immagini resistive (statica e dinamica) dell’FMI “after stress test phase 3” di una porzione delle Argille del Santerno nell’intervallo 1488.0-1489.6 m MD. Nelle immagini si può vedere un esempio di forte scavernamento (come evidenziato anche dalle curva caliper) corrispondente ad un intervallo particolarmente ricco in stiloliti. Nella finestra a destra è illustrato un dettaglio della carota in cui sono particolarmente ben visibili le superfici di stilolitizzazione. Il fatto che tale superfici si siano formate in marne suggerisce una certa abbondanza di carbonato di calcio nella formazione.

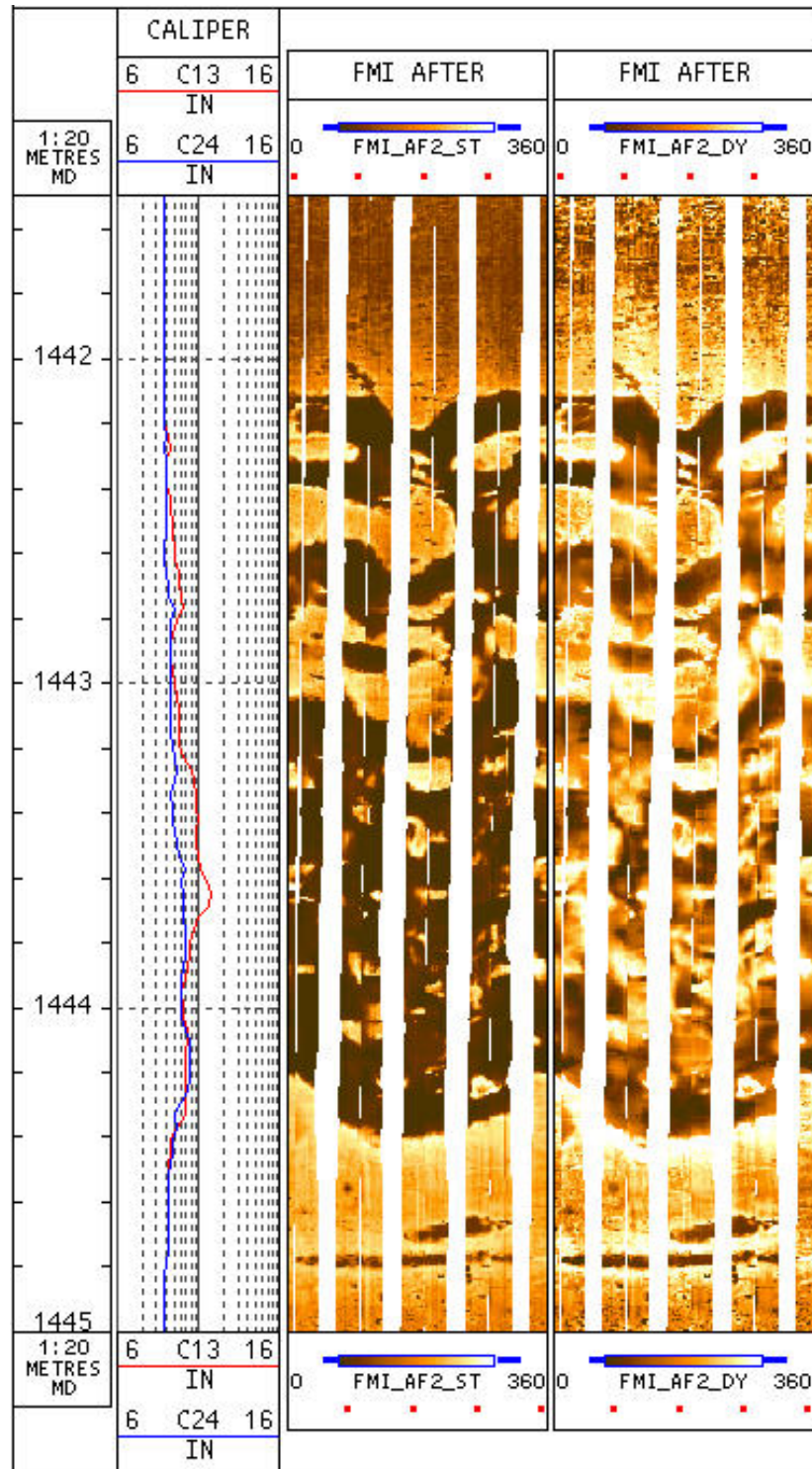


Fig. 3.2.13 – Esempio di zona con un evidente scavernamento. Sono mostrate le immagini resistive dell’FMI “after stress test phase 3”, statica e dinamica, di una porzione delle Argille del Santerno nell’intervallo 1441.5-1445 m MD. Nella colonna di sinistra sono riportate le curve caliper dalle quali si può comprendere ancora meglio l’entità del fenomeno.

3.2.3 Analisi della fratturazione e stress in situ

L'analisi dei log d'immagine FMI ha messo in luce la presenza di alcune fratture naturali che interessano la successione.

In particolare all'interno delle Argille del Santerno sono state individuate un numero molto esiguo di fratture tutte naturali (un totale di 9 di cui 1 di taglio) che mostrano un andamento preferenziale indicando un trend principale di fratturazione con strike NNE-SSW (Figg. 3.2.14 a, 3.2.15, 3.2.16).

All'interno delle Sabbie di Caviaga si sono riconosciute un numero ancora minore di fratture (un totale di 4 di cui 1 di taglio), anche queste tutte naturali, che non evidenziano un'orientazione dominante (Fig. 3.2.14 b e Fig. 3.2.17). All'interno di questa formazione è anche riconoscibile una faglia a circa 1549 m MD con un evidente effetto di drag sui livelli vicini ad essa a seguito del movimento (Fig 3.2.18).

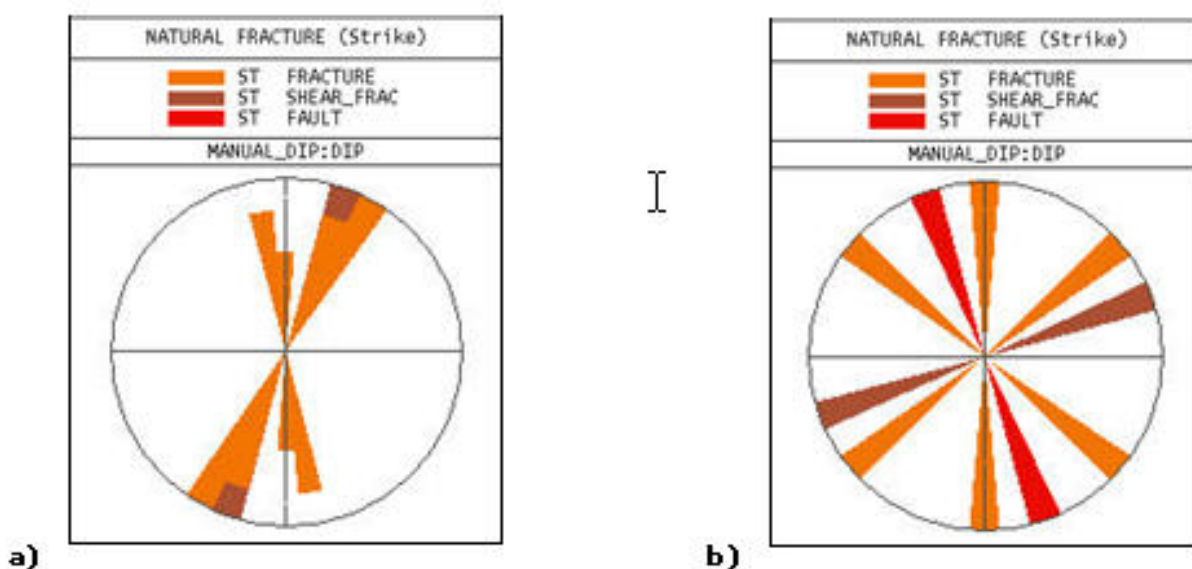


Fig. 3.2.14 – Diagramma a rosa per le superfici tipo fratture all'interno delle due formazioni incontrate dal sondaggio: Argille del Santerno a), Sabbie di Caviaga b).

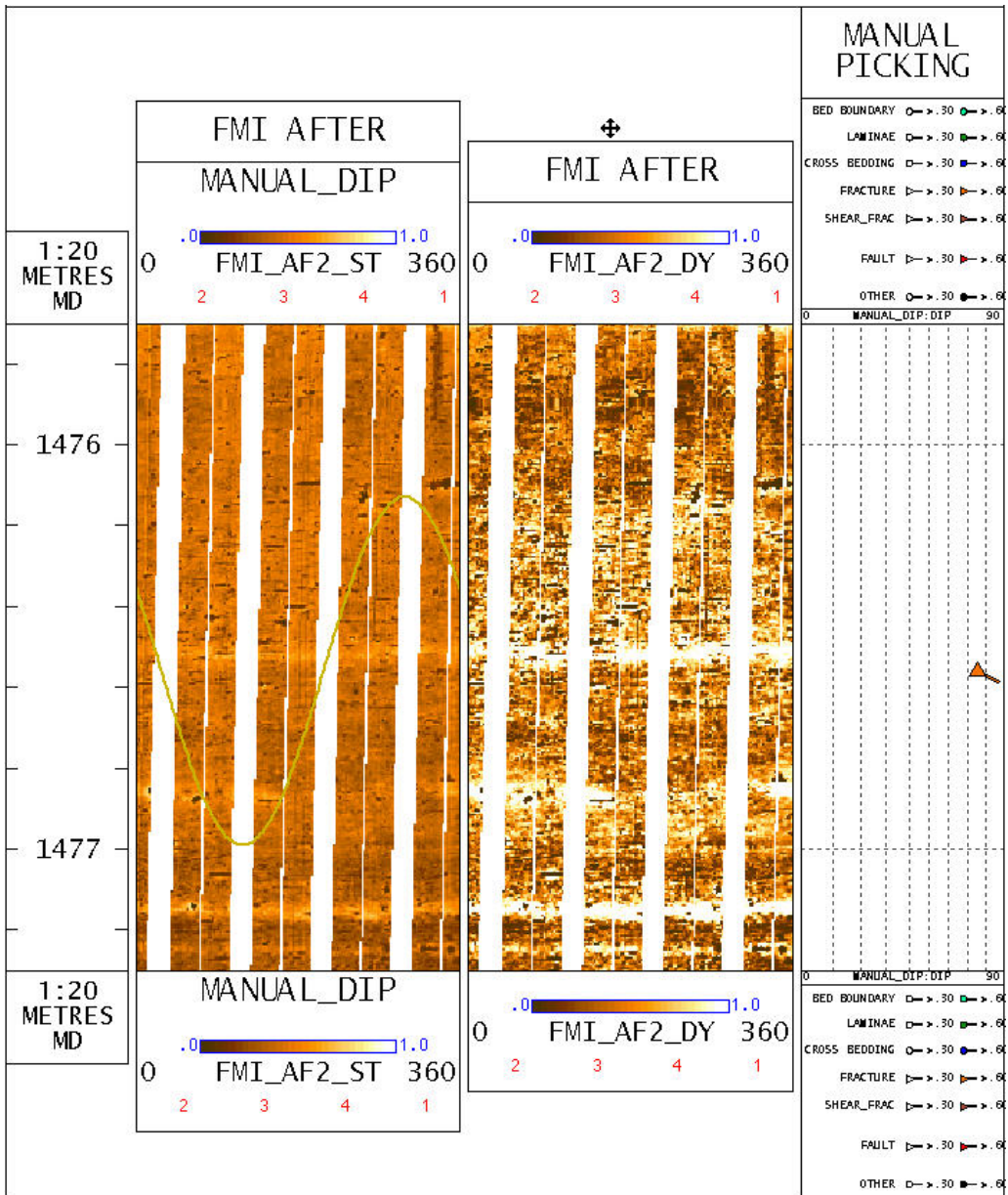


Fig. 3.2.15 – Immagini resistive (statica e dinamica) dell’FMI “after stress test phase 3” di una porzione delle Argille del Santerno nell’intervallo 1475.7-1477.3 m MD. Nelle immagini si può vedere evidenziata dalla sinusoide gialla un esempio di frattura rappresentata anche nella colonna di destra dal tadpole ottenuto dal picking manuale.

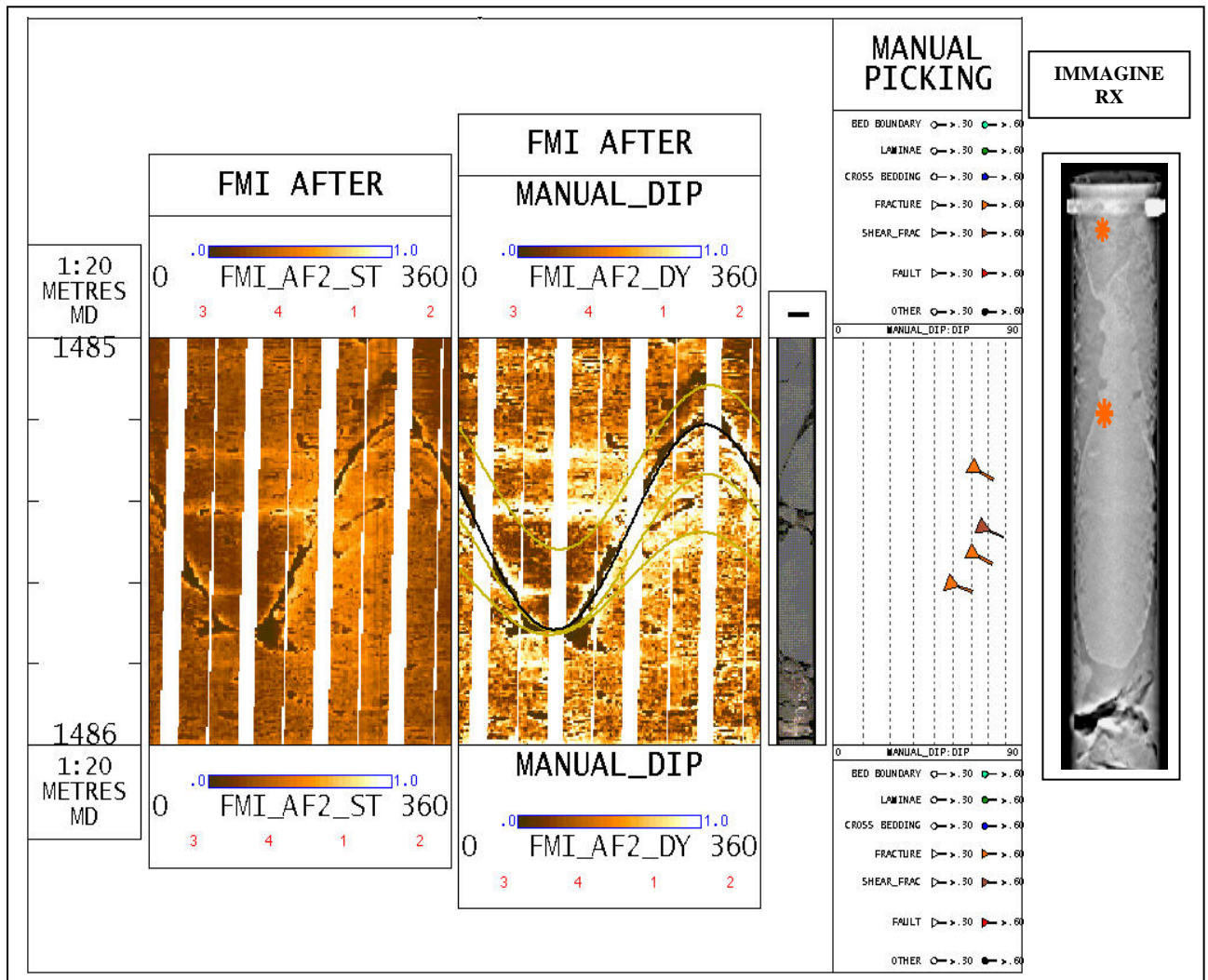


Fig. 3.2.16 – Immagini resistive (statica e dinamica) dell’FMI “after stress test phase 3” di una porzione delle Argille del Santerno nell’intervallo 1485.0-1486.0 m MD. Nelle immagini si può vedere evidenziata dalla sinusoide viola un esempio di frattura shear con associate altre fratture indicate dalle linee gialle. Sulla destra delle immagini è riportata anche la foto della carota alla quota corrispondente e la colonna con i tadpole ottenuti dal picking manuale. Nell’ultima colonna a destra è riportata l’immagine a raggi X acquisita prima ancora di estrarre la carota dal *core barrel*; si può vedere, come evidenziato anche dagli asterischi arancioni, che i piani di frattura sono già chiaramente identificabili.

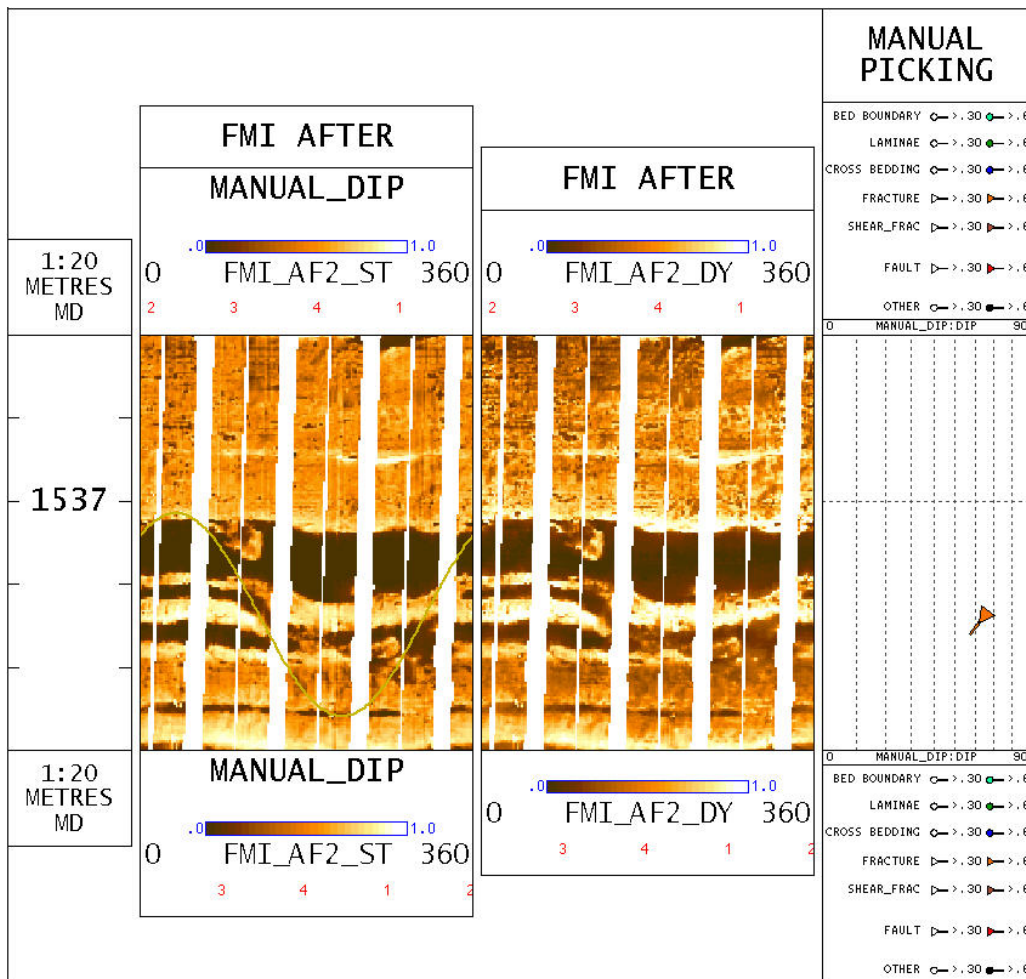


Fig. 3.2.17 – Immagini resistive (statica e dinamica) dell’FMI “after stress test phase 3” di una porzione delle Sabbie di Caviaga nell’intervallo 1536.6-1537.6 m MD. Nelle immagini si può vedere evidenziata dalla sinusoide gialla un esempio di frattura rappresentata anche nella colonna di destra dal tadpole ottenuto dal picking manuale.

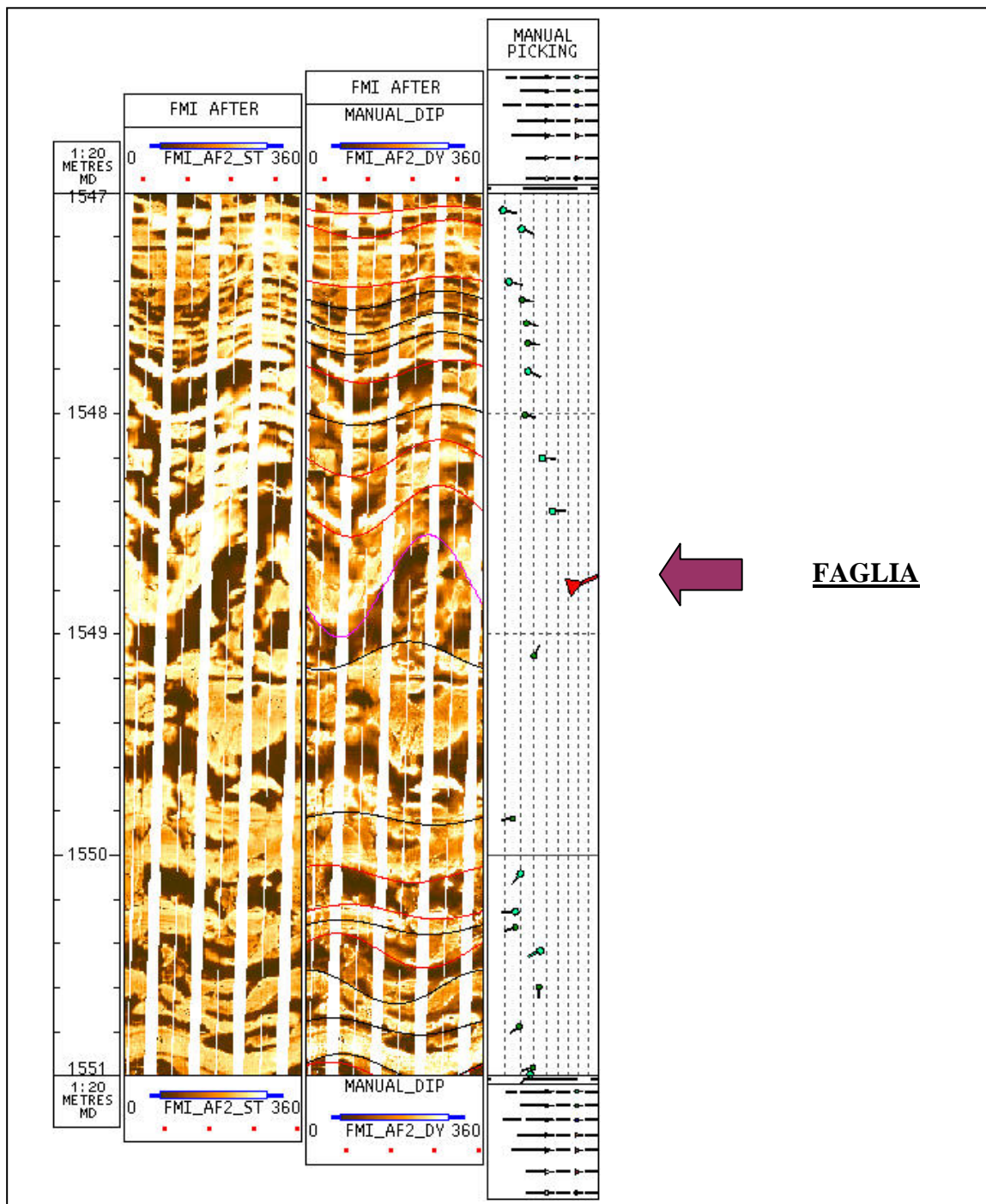


Fig. 3.2.18 – Immagini resistive dell’FMI “after stress test phase 3”, statica e dinamica, di una porzione delle Sabbie di Caviaga nell’intervallo 1547-1551 m MD. Sulla destra la colonna con i tadpole individuati in quest’intervallo tramite il picking manuale. E’ possibile notare, come evidenziato dalla linea viola e dalla freccia, la presenza di una faglia con un evidente effetto drag (letteralmente di trascinamento) sugli strati vicini a seguito della fascia di deformazione indotto dall’attività della faglia.

All’interno dell’intervallo indagato non sono state identificate invece né fenomeni di breakout né fratture indotte e di conseguenza non è stato possibile ottenere nessuna indicazione sullo stress presente in situ.

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 26 di 94
---	---	--	---------------

3.2.4 Risultati

- **Dip Strutturale:** In generale le pendenze strutturali sono state individuate grazie al riconoscimento sulle immagini delle superfici di stratificazione (bed boundary e laminae). La determinazione della pendenza strutturale media a scala di pozzo identificata mediante il processing automatico ha evidenziato una stratificazione regolare con piani che immergono prevalentemente verso ESE (circa 250°) con inclinazioni estremamente basse (in media 2°), comuni sia alle Argille del Santerno che alle Sabbie di Caviaga. La bassa pendenza dei livelli indagati suggerisce l'assenza di effetti evidenti di tilting tettonico. La planarità dei livelli indagati dai log di immagine si perde principalmente nelle facies ghiaiose/pebbly mudstone dove sono visibili superfici deposizionali ad alto angolo (con pendenze fino a 60°). Questi livelli il più delle volte caotici sono ricchi in frustoli vegetali carboniosi e clay chips.
- **Bad Hole:** Sono stati individuati livelli da decimetrici a metrici caratterizzati da un forte scavamento. Tale fenomeno non è associato né all'attività di perforazione (fango, scalpello,...) né a variazioni sedimentologiche o composizionali della formazione. Ciò potrebbe piuttosto essere connesso ad anisotropie interne del corpo argilloso dovute a fenomeni diagenetici differenziali.
- **Fratture:** All'interno delle Argille del Santerno sono state individuate un numero molto esiguo di fratture tutte naturali (un totale di 9 di cui 1 di taglio) che mostrano un andamento preferenziale indicando un trend principale di fratturazione con strike NNE-SSW. All'interno delle Sabbie di Caviaga si sono riconosciute un numero ancora minore di fratture (un totale di 4 di cui 1 di taglio), anche queste tutte naturali, che non evidenziano un'orientazione dominante. All'interno di questa formazione è anche riconoscibile una faglia a circa 1549 m MD.
- **Stress in Situ:** All'interno dell'intervallo indagato non sono state identificate invece né fenomeni di breakout né fratture indotte e di conseguenza non è stato possibile ottenere nessuna indicazione sullo stress presente in situ.

3.3 Interpretazione del log SonicScanner

3.3.1 Controllo di qualità del dato raw

Nel pozzo Ripalta 63 dir è stato registrato il nuovo tool sonico digitale SonicScanner (MSIP) di Schlumberger come già precedentemente fatto nei pozzi San Salvo 81 foro 2 e Sergnano 45 dir.

Nel caso specifico di Ripalta 63 dir il SonicScanner è stato registrato in due run. Il primo run (360-1420 m, del 2-agosto -2007) con densità del fango 1.4 gr/cc , con diametro 12.25". Il foro mostra una cattiva qualità (scavamento e

rugosità) nell'intervallo da 1090 a 1220 m mentre al top (970-1090 m) la qualità è buona.

Il secondo run (1290-1825 m, del 30-agosto-2007), con densità del fango 1.32 gr/cc con diametro del foro 8.5" In questo intervallo il foro è buono nell'intervallo a sabbie mentre è di cattiva qualità nelle parti argillose.

La caratteristica di questo tool è quella di fornire una risposta acustica monopolare e dipolare secondo l'asse, l'azimuth e il raggio del pozzo permettendo di misurare le variazioni di velocità della formazione in prossimità e lontano dal foro. E' costituito da 13 ricevitori (con 8 elementi) e 6 sorgenti.

Nella tabella 3.3.1 sono riportate le caratteristiche delle modalità di acquisizione.

No	Measurement	Stations	Elem	Receivers	Dig Time (μ s)	Interval (μ s)	Samples
1	MU-MF	13	4	52	2550	10	256
2	ML-MF	13	4	52	2550	10	256
3	MF-MF	13	4	52	5110	10	512
4	MF-LF	13	4	52	20440	40	512
5	XD -cd	13	8	104	30480	40	762
6	YD-cd	13	8	104	30480	40	762

MU-MF	Monopole Upper, Mid Frequency
ML-MF	Monopole Lower, Mid Frequency
MF-MF	Monopole far, Mid Frequency
MF-LF	Monopole Far Low Frequency
XD-cd	X-Dipole Chirp drive
YD-cd	Y-Dipole Chirp drive

Tab. 3.3.1 – Sonic Scanner: modalità di acquisizione.

Questa vasta quantità di informazioni permette di produrre svariati prodotti interpretativi.

Nel pozzo in oggetto questa acquisizione aveva un duplice obiettivo: di verificare la resistenza delle argille della formazione (argille e reservoir a sabbie) e di capire se la formazione presenti un certo grado di anisotropia e definirne l'origine di questa.

Nel caso di Ripalta 63 dir sono stati elaborati il profilo radiale di velocità del dipolo e monopolo, l'anisotropia delle onde shear e l'anisotropia 3D, la permeabilità da Stoneley.

Le elaborazioni di tali dati sono state fatte da Schlumberger Data&Consulting Services – DCS Romania.

In ENI E&P è stato fatto un controllo di qualità, un analisi critica ed una integrazione di tali dati.

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 28 di 94
---	---	--	---------------

Prima di discutere la qualità dei dati è necessaria una breve spiegazione su alcuni passaggi fatti per la definizione di un corretto Dt compressionale, shear e stoneley.

I Dt sono stati calcolati utilizzando un software (BestDT nella piattaforma Geoframe), una tecnica di ottimizzazione e un processo di similitudine capaci di trattare forme d'onda dispersive (arrivi shear) e non dispersive (arrivi compressionali). Il dt finale calcolato è compensato per l'effetto foro.

Per le forme d'onda dispersive (variazione della velocità al variare della frequenza) è disponibile anche un modulo che lavora sulle frequenze. Questo è molto utile per un QC dell'arrivo delle shear. Il Dt che deriva dalla sorgente dipolare dovrebbe essere catturato al limite più basso della banda di frequenza. Talvolta però quando la formazione è molto lenta (come nel caso del run 12.25" di Ripalta 63 dir) quest'ultimo passaggio non è sufficientemente accurato a causa dell'alterazione vicino alle pareti del foro per cui viene utilizzato un algoritmo di inversione (SPI = Shear Parametric Inversion) capace di ricostruire la curva di dispersione.

La qualità delle forme d'onda originali (13) è stata controllata in termini di consistenza, rumore e contenuto di frequenza rivelando un buon funzionamento del tool. Tutte le forme d'onda provenienti dalla sorgente Monopolare, Dipolare e Stoneley sono caratterizzate da una buona consistenza indicando un buon funzionamento di tutti i ricevitori.

In Fig. 3.3.1 è rappresentato il plot di qualità della modalità MF di un tratto del run 12.25".

Come si vede è presente , nella parte alta, l'arrivo del casing e un arrivo più lento chiamato Leaky-P. Questo arrivo è un "borehole mode" presente in formazioni lente e si avvicina all'arrivo del fango ad alta frequenza.

In Fig. 3.3.2 è invece rappresentato il plot di qualità della modalità MF di un tratto del run 8.5". In questo caso, poiché la formazione risulta più veloce del run precedente è possibile registrare anche con la sorgente monopolare l'arrivo delle onde shear mentre non compaiono più le Leaky-P.

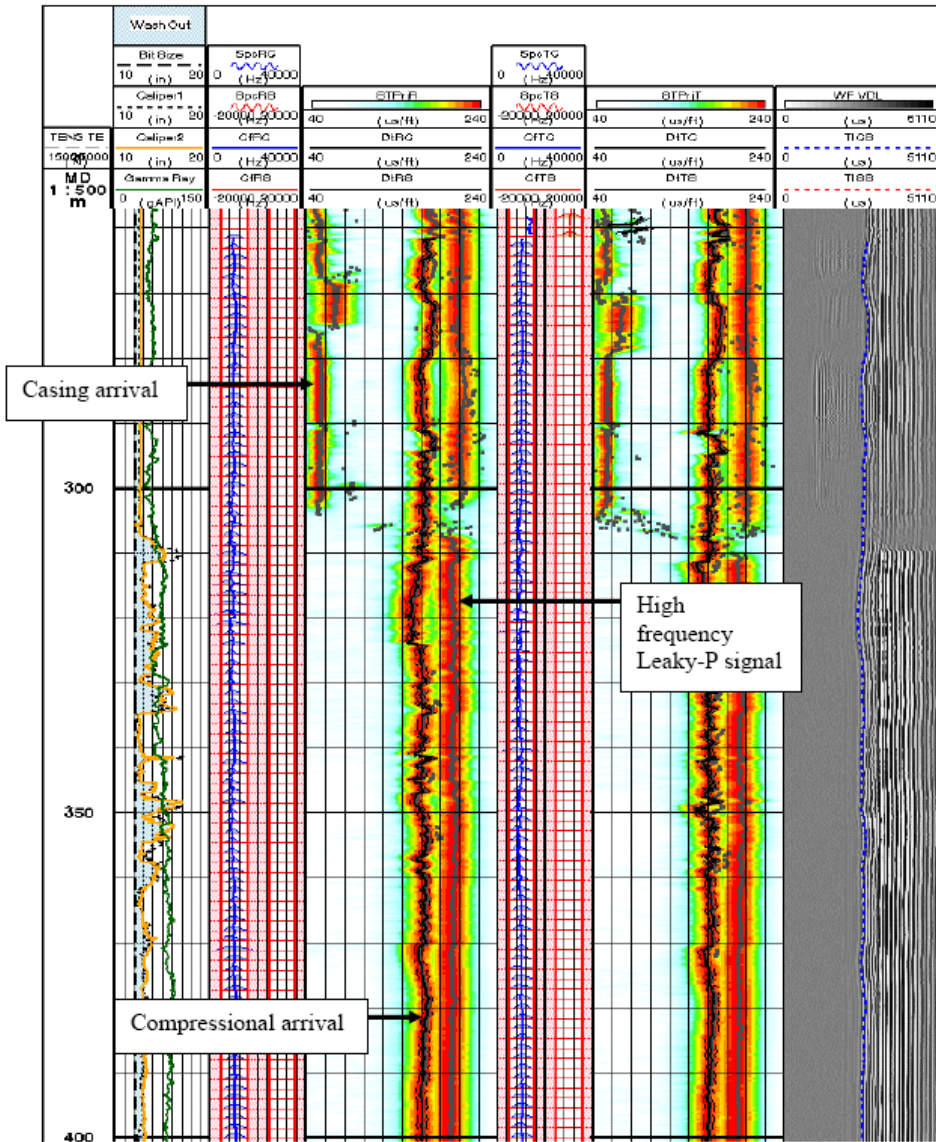


Fig. 3.3.1 – Run 12.25": QC della modalità MF dove si vede l'arrivo del casing e la presenza di Leaky-P.

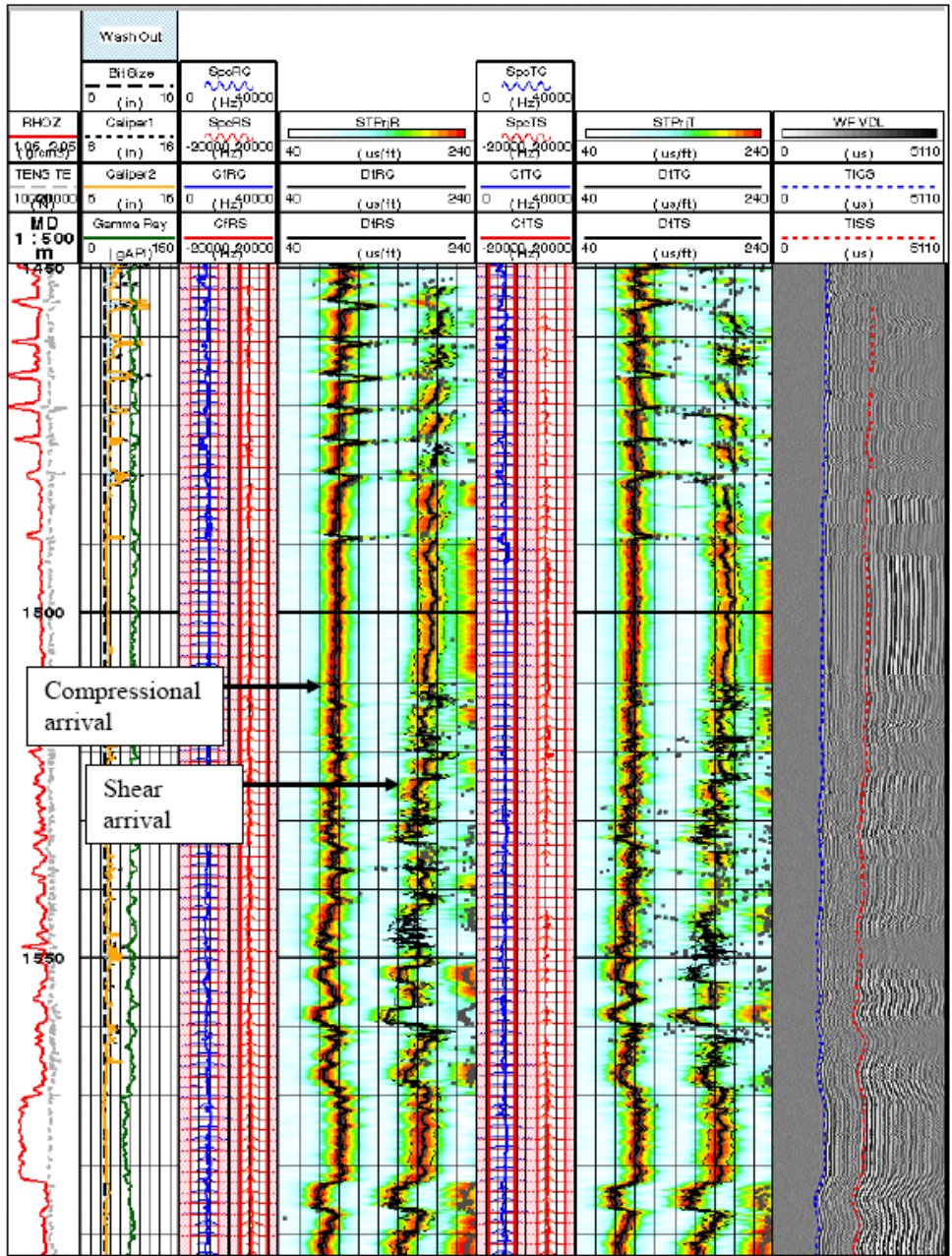


Fig. 3.3.2 – Run 8.5": QC della modalità MF dove si vede anche l'arrivo dell'onda shear

Anche per la modalità di acquisizione MST sono stati fatti i plot di QC. In Fig.3.3.3 è rappresentato un tratto del run 12.25" dove è evidente nell'intervallo 960-990 m un segnale molto debole fino ad assente dovuto alla presenza di scavernamento del foro. Nel run 8.5" (Fig.3.3.4) il segnale è forte e coerente anche se il dt stoneley aumenta in corrispondenza di livelli scavernati (intervallo 1460-1490 m)

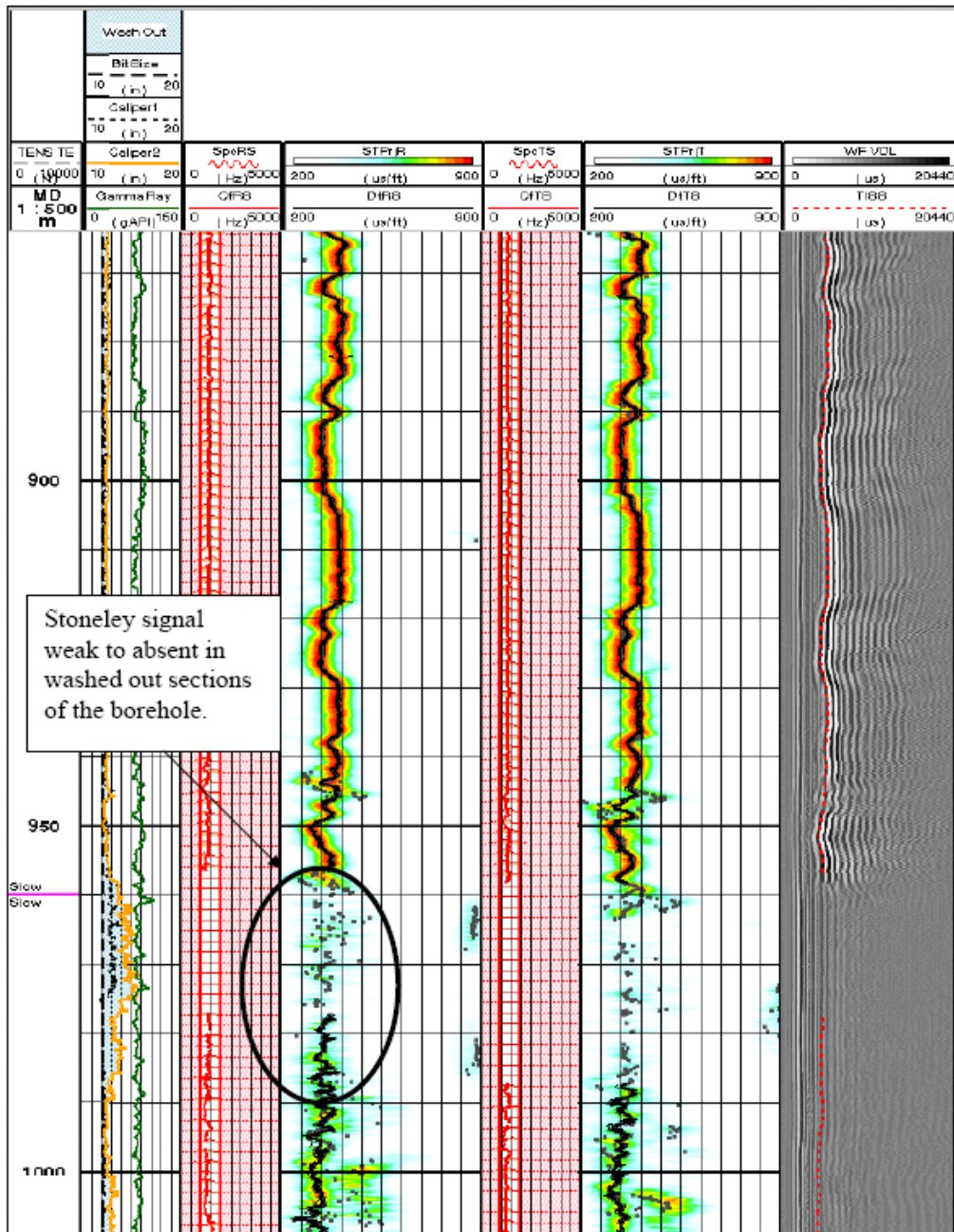


Fig. 3.3.3 – Run 12.25": QC della modalità MST dove si nota un intervallo con segnale da debole ad assente.

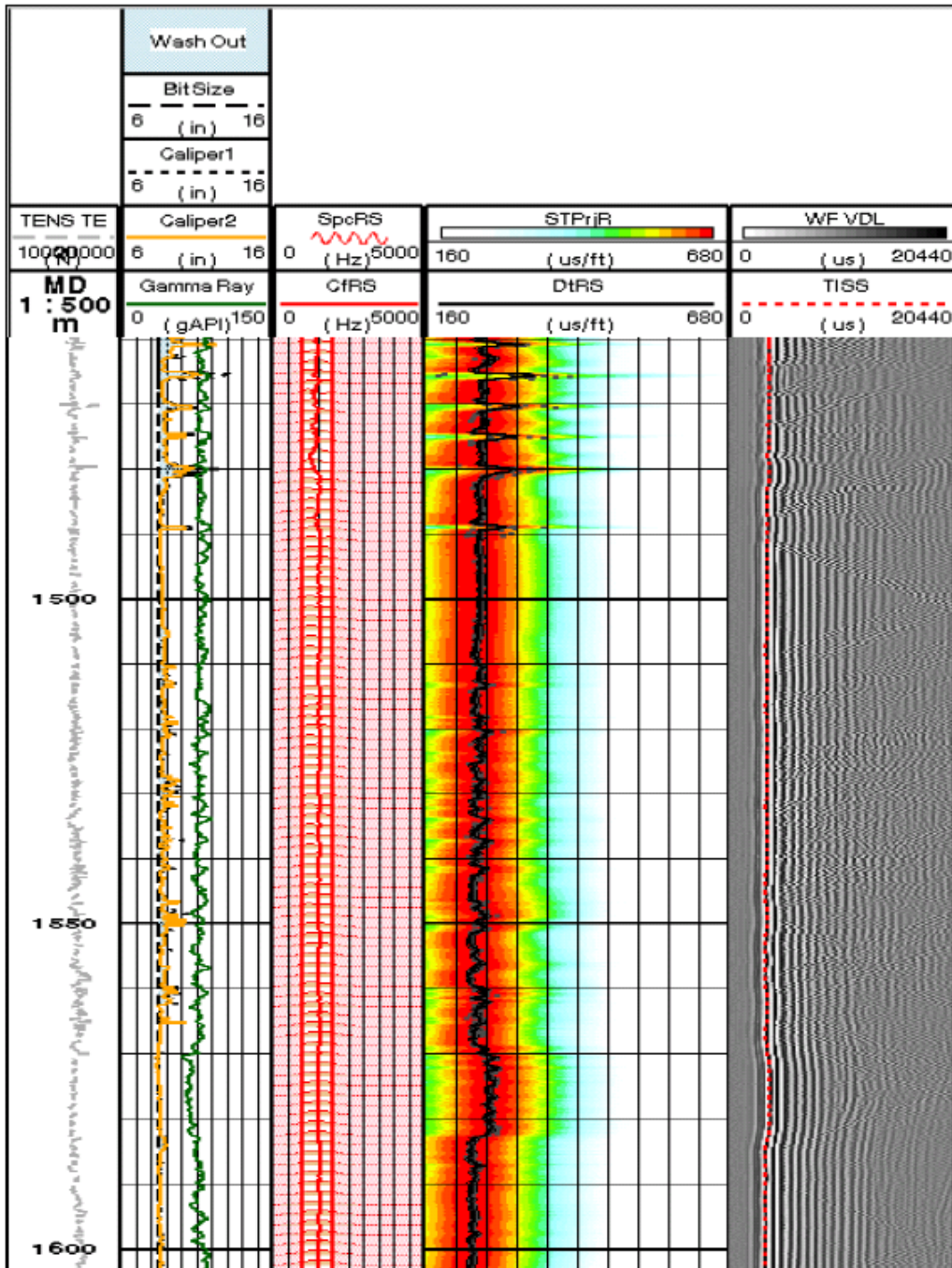


Fig. 3.3.4 – Run 8.5": QC della modalità MST dove si nota una buona coerenza e continuità del segnale.

Per quanto riguarda la sorgente dipolare e l'acquisizione dell'arrivo shear (onda dispersiva per cui varia la velocità al variare della frequenza) risulta molto importante fare un'analisi delle frequenze. Come è stato precedentemente illustrato, l'arrivo delle onde shear deve essere definito nel limite più basso della proiezione dell'analisi di frequenza in modo da catturare la risposta a bassa frequenza del segnale.

Nella Fig. 3.3.5 è riportato nella traccia 5 il risultato dell'analisi di frequenza del run 12.25" fatta sia con BestDT che con SPI. Dove è presente un'alterazione del

foro la curva di dispersione delle onde flessurali (da cui poi si ricavano le shear) diventa molto steep causando una correzione per lo standard BestDT meno accurata mentre l'approccio SPI appare migliore.

Per quanto riguarda il risultato del processing nel run 8.5", rappresentato in Fig. 3.3.6, si nota che il BestDT produce un risultato accurato eccetto nell'intervallo 1570-1583 m, dove è stato utilizzato il risultato da SPI.

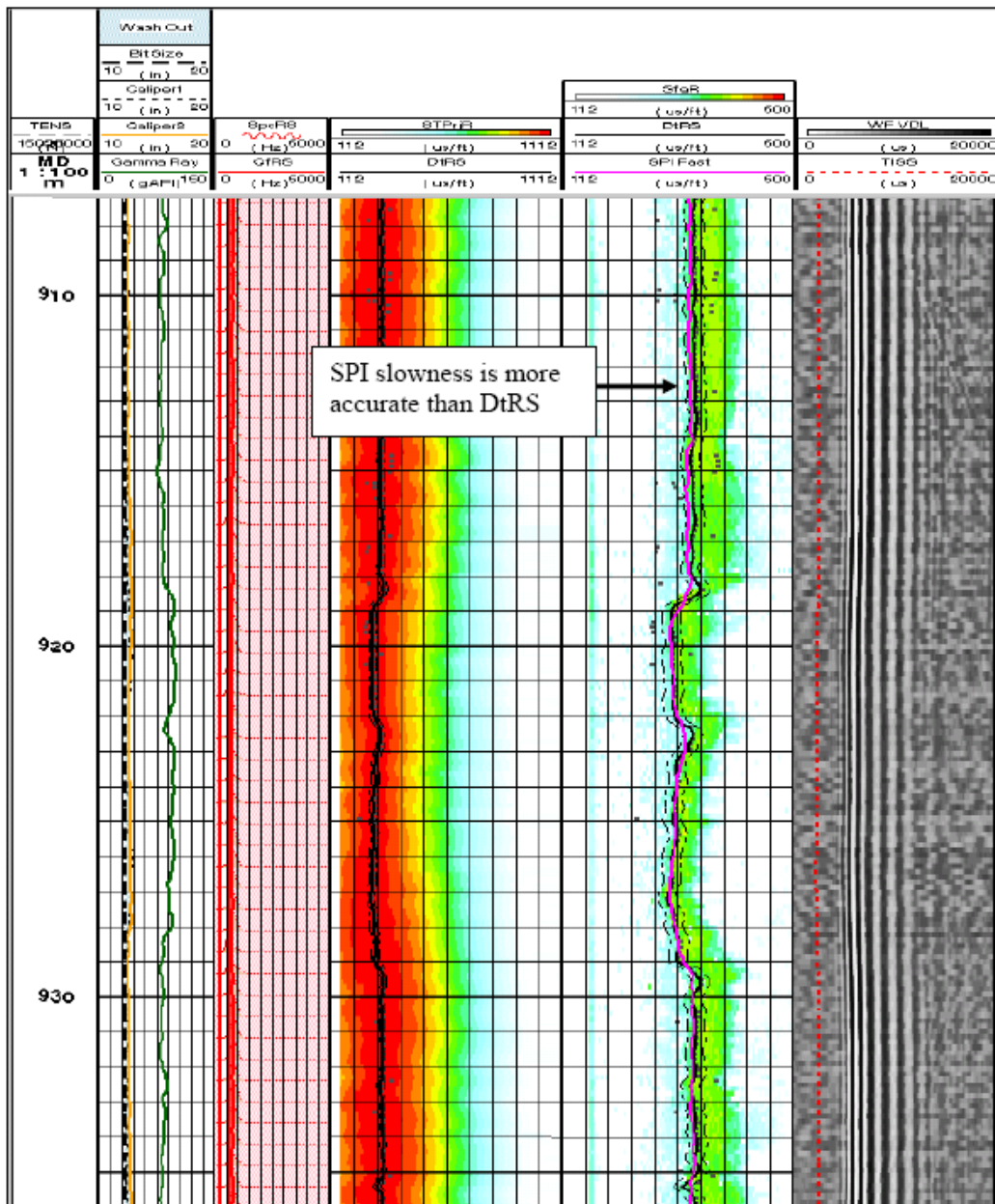


Fig. 3.3.5 – Run 12.25": QC della modalità Dipole. In colonna 5 si nota una differenza di arrivo tra il Dt shear calcolato da BestDT e SPI.

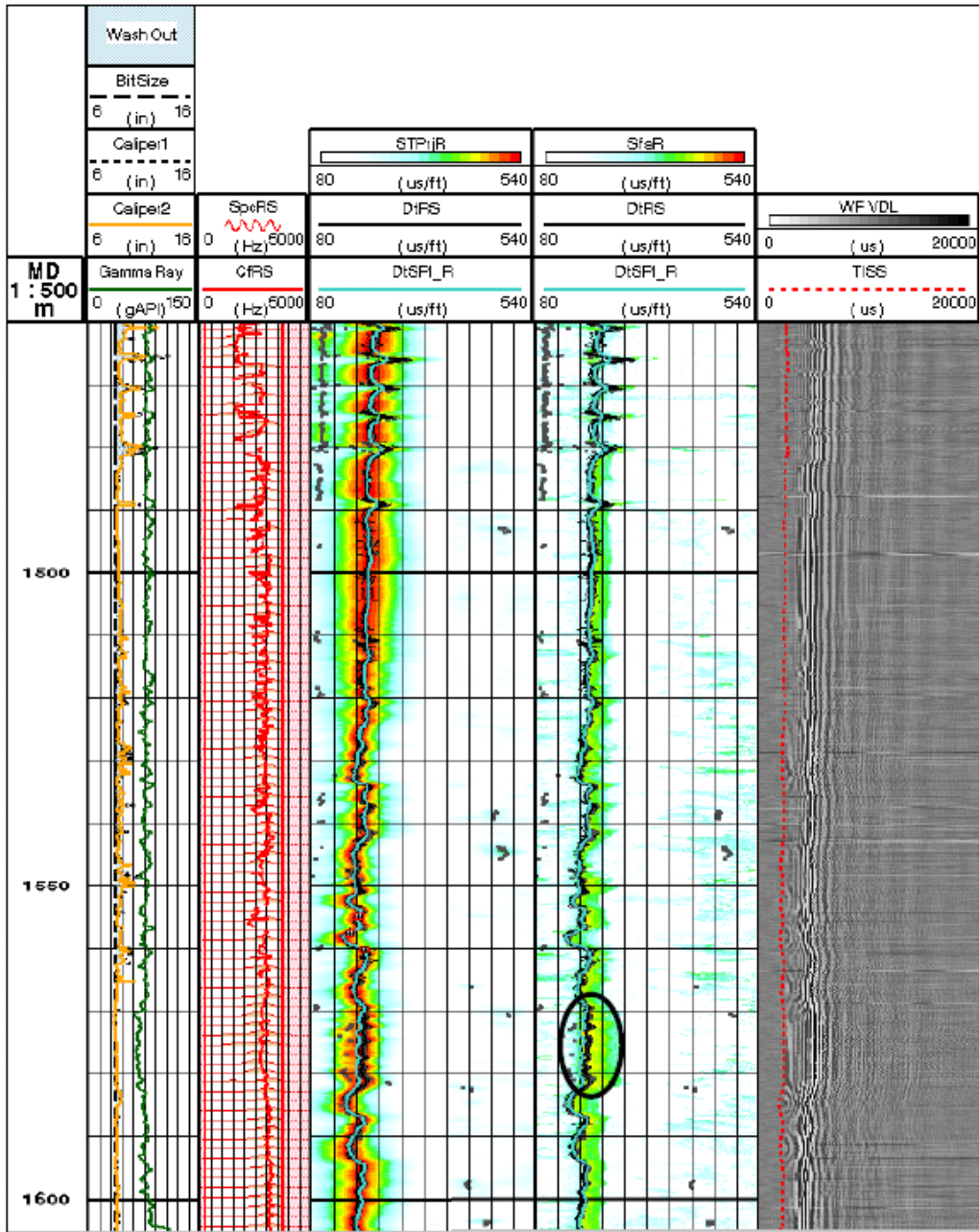


Fig. 3.3.6 – Run 12.25": QC della modalità Dipole. Entrambi gli approcci BestDt e SPI danno buoni risultati (colonna 5) eccetto che nell'intervallo 1570-1583 dove è stato utilizzato il risultato di SPI.

La Fig. 3.3.7 (cross plot di dt compressionale verso VPVS) ha lo scopo di meglio visualizzare il comportamento dei Dt nei due diversi run: nel run 12.25" il comportamento rispecchia quello di una formazione da lenta a molto lenta mentre il run 8.5" rispecchia il comportamento di una formazione mediamente veloce.

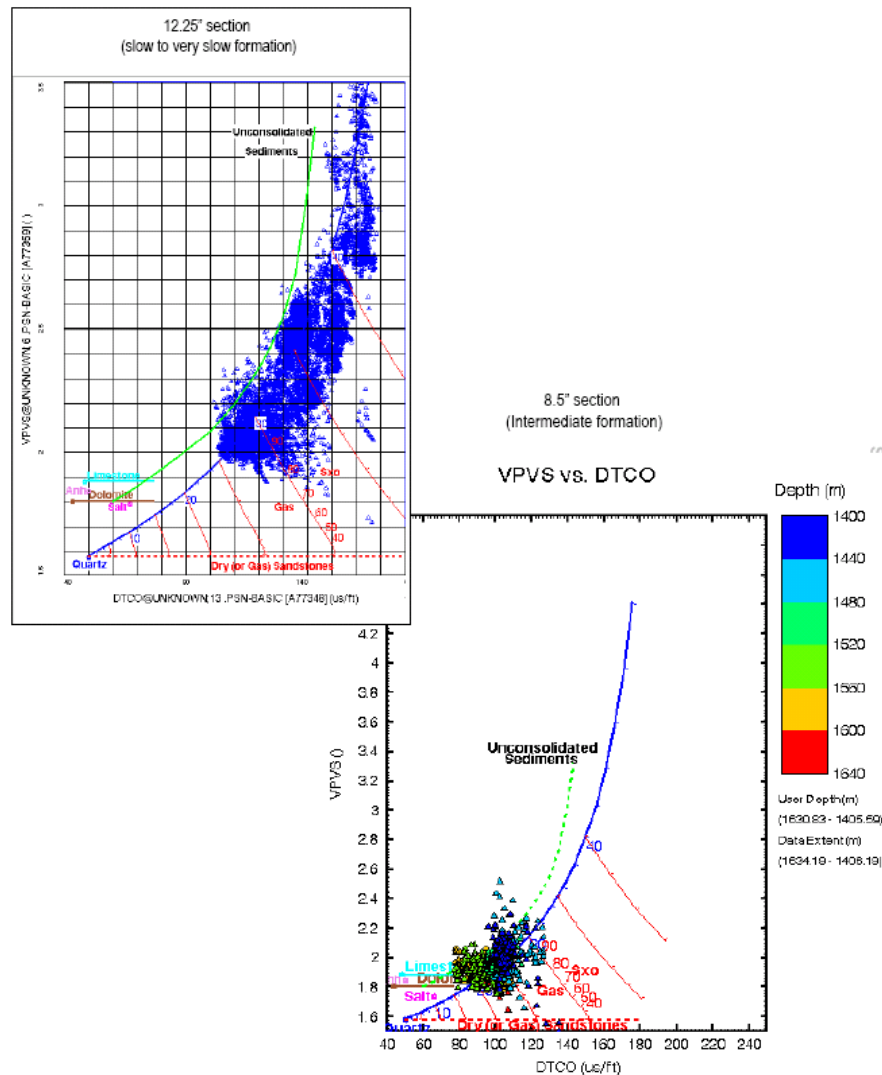


Fig. 3.3.7 – Cross plot Dt compressionale verso VPVS per evidenziare il diverso comportamento della velocità nei due run.: run 12.25" formazione lenta, run 8.5" formazione intermedia.

Un ulteriore controllo di qualità è stato fatto sulle inclinometrie fornite dall'attrezzo GPIT che sono essenziali per un corretto calcolo nel successivo processing dell'anisotropia acustica.

In questo caso i risultati ottenuti da GPIT mostrano livelli di tolleranza accettabili per un'accurata posizione del tool in riferimento al campo magnetico terrestre.

3.3.2 Controllo di qualità del dato interpretato

3.3.2.1 Anisotropia da shear

Quando un'onda shear attraversa una formazione ed incontra una superficie di discontinuità si divide in due componenti ortogonali: una veloce parallela alla superficie ed una lenta perpendicolare ad essa. Attraverso

l'acquisizione di dati provenienti da sorgenti dipolari ortogonali e registrati su sensori azimutali è possibile calcolare, attraverso una rotazione matematica, la direzione e la velocità dell'onda shear "slow" e "fast" che attraversa la formazione.

Conoscendo l'orientazione del tool è possibile quindi definirne la direzione dell'onda shear veloce che viene definita come "fast-shear azimuth".

Oltre a definire la velocità "slow" e "fast" dell'onda shear è possibile calcolare l'anisotropia attraverso l'energia delle onde, lo slowness ed il tempo di transito.

L'anisotropia da energia ha un valore più qualitativo mentre quella da slowness (risoluzione verticale di 3 ft) e da tempo di transito (risoluzione verticale di 13 ft) hanno un valore quantitativo.

L'anisotropia acustica può essere intrinseca o indotta dallo stress. L'intrinseca è causata da bedding, microstrutture o fratture allineate. Quella indotta da stress fornisce la direzione di Maximum Horizontal Stress (che corrisponde alla direzione del "fast shear").

Oltre a definire la presenza di anisotropia è possibile definirne l'origine grazie all'analisi della dispersione. Le onde flessurali che vengono registrate dal SonicScanner sono dispersive cioè le basse frequenze investigano più in profondità la formazione mentre le alte frequenze investigano la regione vicino al foro. In questo modo si possono costruire delle curve di dispersione che comparate con un modello isotropico permetterebbero di identificare il meccanismo dell'anisotropia.

In Fig 3.3.8 sono riportati i quattro casi possibili dove in nero è rappresentato il modello isotropico mentre in rosso e blu i dati di fast e slow shear.

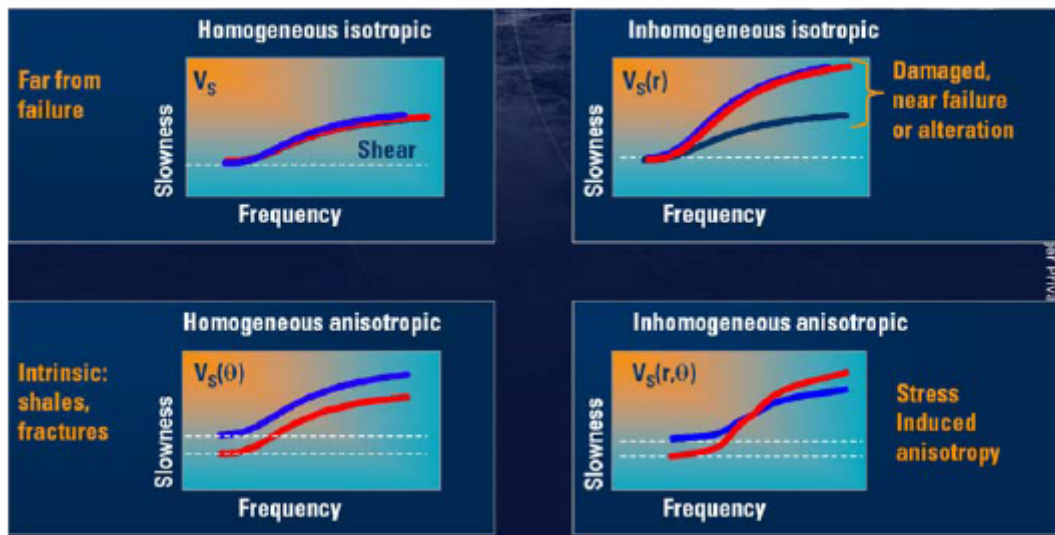


Fig. 3.3.8 Curve di dispersione che permettono di identificare il meccanismo dell'anisotropia.

L'anisotropia shear deve mostrare una geometria visibile dal tool: superfici perpendicolari al tool non possono essere viste. Più le superfici sono pendenti rispetto al tool più sono visibili.

Spesso la bassa pendenza provoca delle incertezze nel calcolo del fast shear azimuth.

Il calcolo dell'anisotropia è stato effettuato in entrambi i run mostrando generalmente assenza/bassissima presenza di anisotropia eccetto da 1530 a 1600 m in corrispondenza del reservoir.

Qui di seguito vengono brevemente descritti i risultati ottenuti lungo il pozzo. Nella prima traccia è rappresentata l'anisotropia da energia (qualitativa), nella terza traccia il fast shear azimuth con la relativa incertezza di calcolo (banda grigia) e in quarta traccia il Dt fast e slow, l'anisotropia da tempo di transito (azzurra) e quella da slowness (verde)

Run 12.25" (360-1420 m).

Come precedentemente detto, l'anisotropia in questo intervallo è pressoché assente eccetto da 1315 m a 1340 m dove abbiamo un valore di anisotropia compreso tra 4 e 8% (Fig. 3.3.9). L'anisotropia risulta comunque di tipo intrinseco.

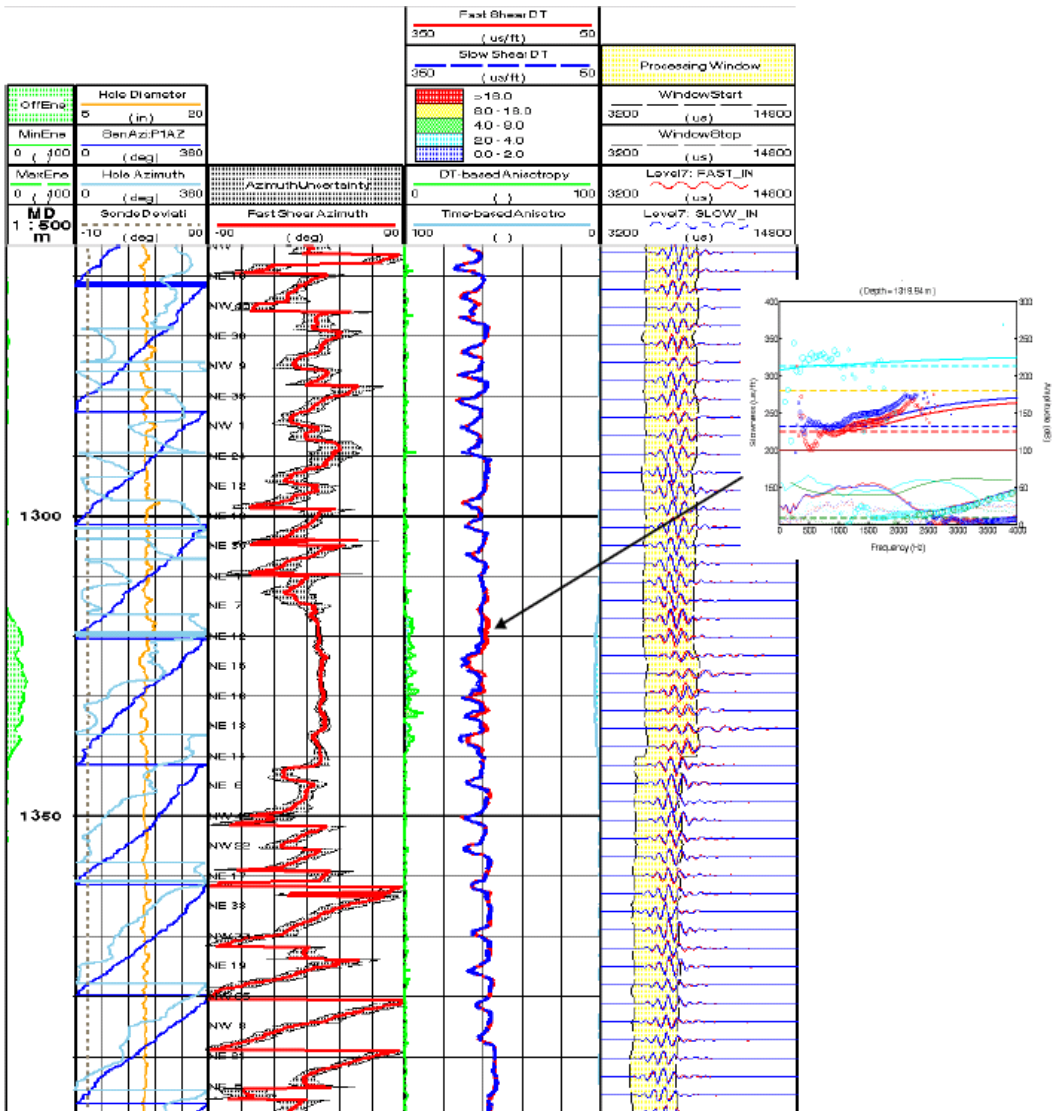


Fig. 3.3.9 – L'anisotropia più evidente osservata nel run 12.25" si colloca nell'intervallo 1315-1340 m.

Run 8.5" (1431-1620 m).

L'analisi della dispersione indica che l'anisotropia riscontrata nell'intervallo delle sabbie a gas (1570-1583 m) è di tipo intrinseco (Fig. 3.3.10) mentre nell'intervallo da 1529-1531 m l'analisi della dispersione indica un'anisotropia indotta da stress con Fast shear azimuth NE 5 deg. (Fig.3.3.11). L'analisi delle immagini FMI mettono in mostra in questo intervallo una sottile laminazione suborizzontale.

I risultati dell'analisi lungo tutto l'intervallo è riportato in Fig. 3.3.12.

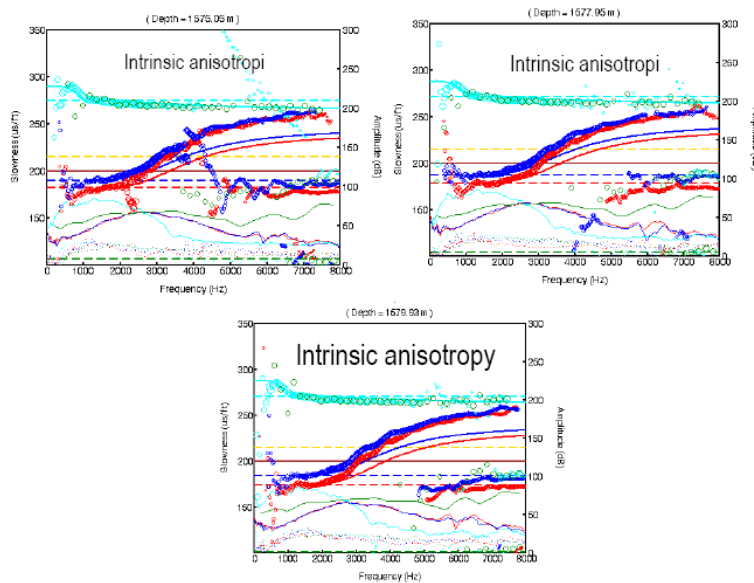


Fig. 3.3.10 – Cross plot di dispersione lungo il run 12.25" che indicano un tipo di anisotropia intrinseca.

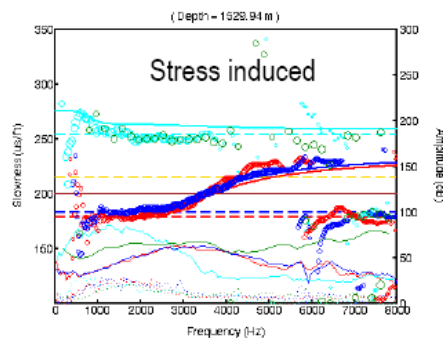


Fig. 3.3.11 – Cross plot di dispersione dell'intervallo 1529-1531 m che indicano un tipo di anisotropia da stress.

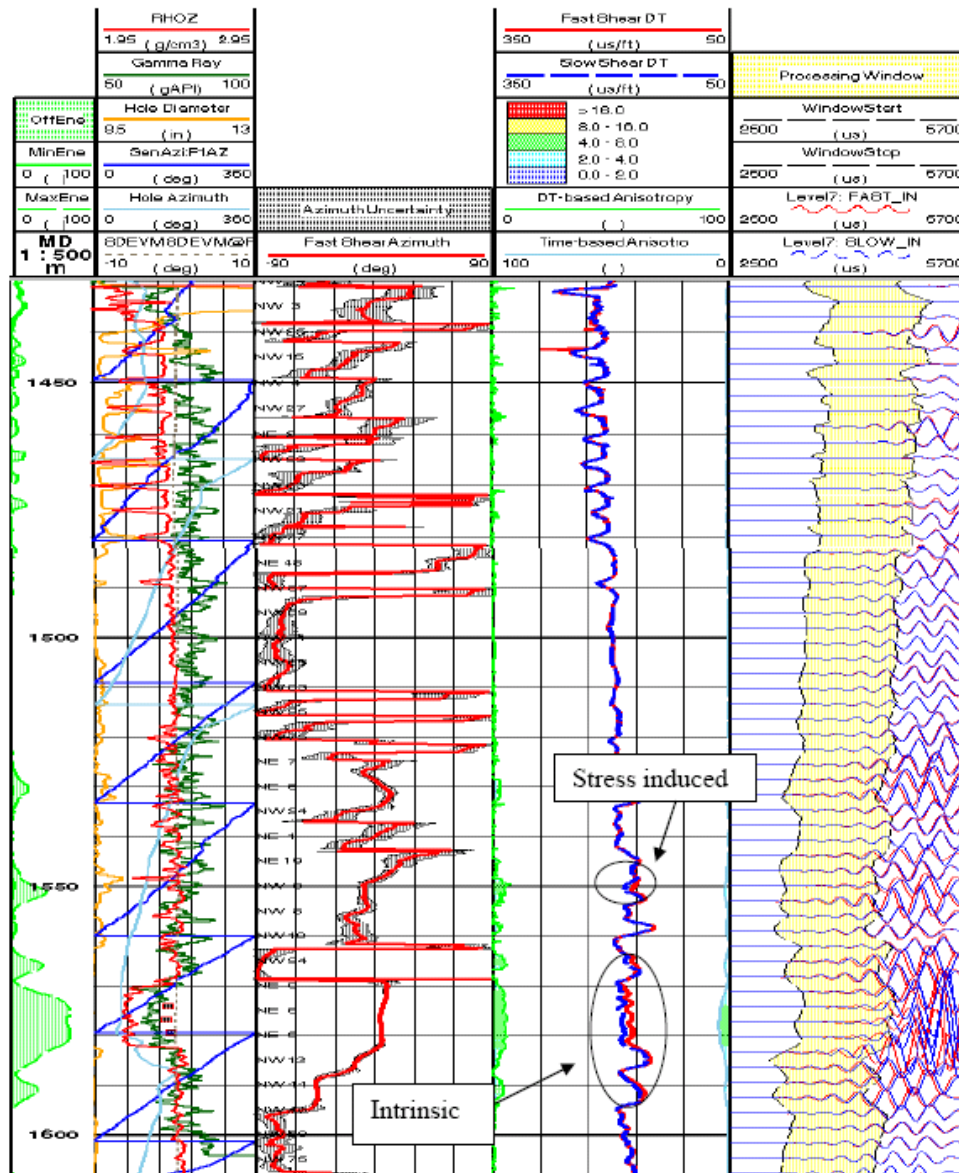


Fig. 3.3.12 – Risultato dell’anisotropia lungo l’intervallo 8.5”.

3.3.2.2 Anisotropia 3D

L’algoritmo riferito all’anisotropia 3D trasforma il dt compressionale, shear (fast e slow) e Stoneley misurato rispetto all’asse del foro, in moduli anisotropici riferiti all’asse di anisotropia terrestre considerando la deviazione del pozzo dalla verticale e i dip stratigrafici.

Con lo strumento SonicScanner si può misurare l’anisotropia sul piano X2-X3 e sul piano X1-X3. Utilizzando l’onda Stoneley si può invertire l’onda shear sul terzo piano ortogonale X1-X2 (Fig. 3.3.13).

Più il piano considerato è rigido, più è grande la velocità e maggiore è C (shear modulus).

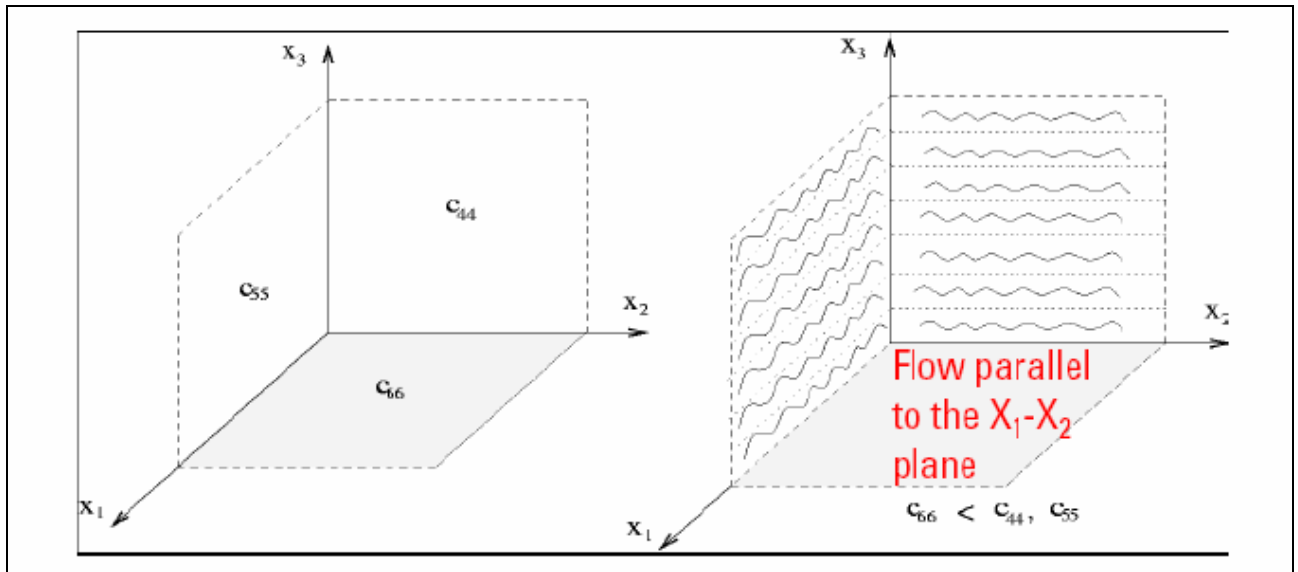


Fig. 3.3.13 Piani dei moduli shear nelle tre dimensioni.

Con questi moduli di anisotropia è possibile classificare il tipo di anisotropia della formazione in isotropia, isotropia trasversale (TI) o ortorombica come viene schematizzato in figura 3.3.14.

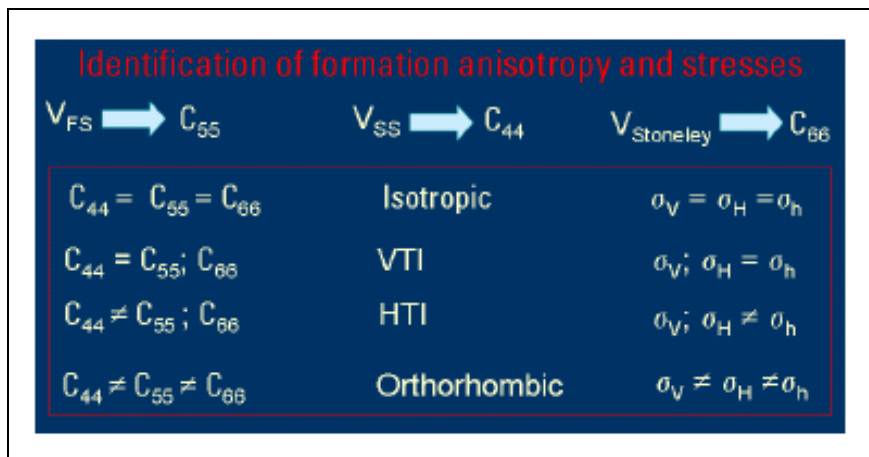


Fig. 3.3.14 Identificazione dell'anisotropia della formazione.

E' necessario segnalare che la presenza di mobilità riduce lo shear modulus nel piano parallelo al flusso legato ai pori connessi o alle fratture. Rappresentando graficamente C_{44} o C_{55} verso C_{66} è possibile identificare rapidamente gli intervalli permeabili da quelli impermeabili.

I moduli C_{55} e C_{44} derivano dallo shear misurato mentre C_{66} proviene dallo shear ricavato dalla Stoneley. Si ricorda che il modulo C_{66} è molto delicato da calcolare in quanto presenta forte limitazioni legate al tipo di misura e al modello utilizzato.

Nel caso di Ripalta 63 dir i risultati di questo processing sono riassunti nella Fig. 3.3.15 dove si osserva quanto segue:

- sopra 1490 m la cattiva qualità del foro influenza fortemente il calcolo del modulo shear che quindi non è attendibile.

- Nell'intervallo 1510-1565 m i risultati vanno presi con attenzione poiché il foro è talvolta rugoso influenzando il density.
- L'area gialla indica un'anisotropia TIV. Gli intervalli etichettati con la lettera B e C mostrano anisotropia TIV, gli intervalli etichettati con la lettera C rappresentano strati sottili.
- Gli intervalli etichettati con la lettera D (area rossa) indicano effetti di permeabilità sull'onda Stoneley.
- Gli intervalli etichettati con lettera E mostra un'anisotropia TIV maggiore rispetto a B e C.
- Altri livelli sono risultati come ortorombici

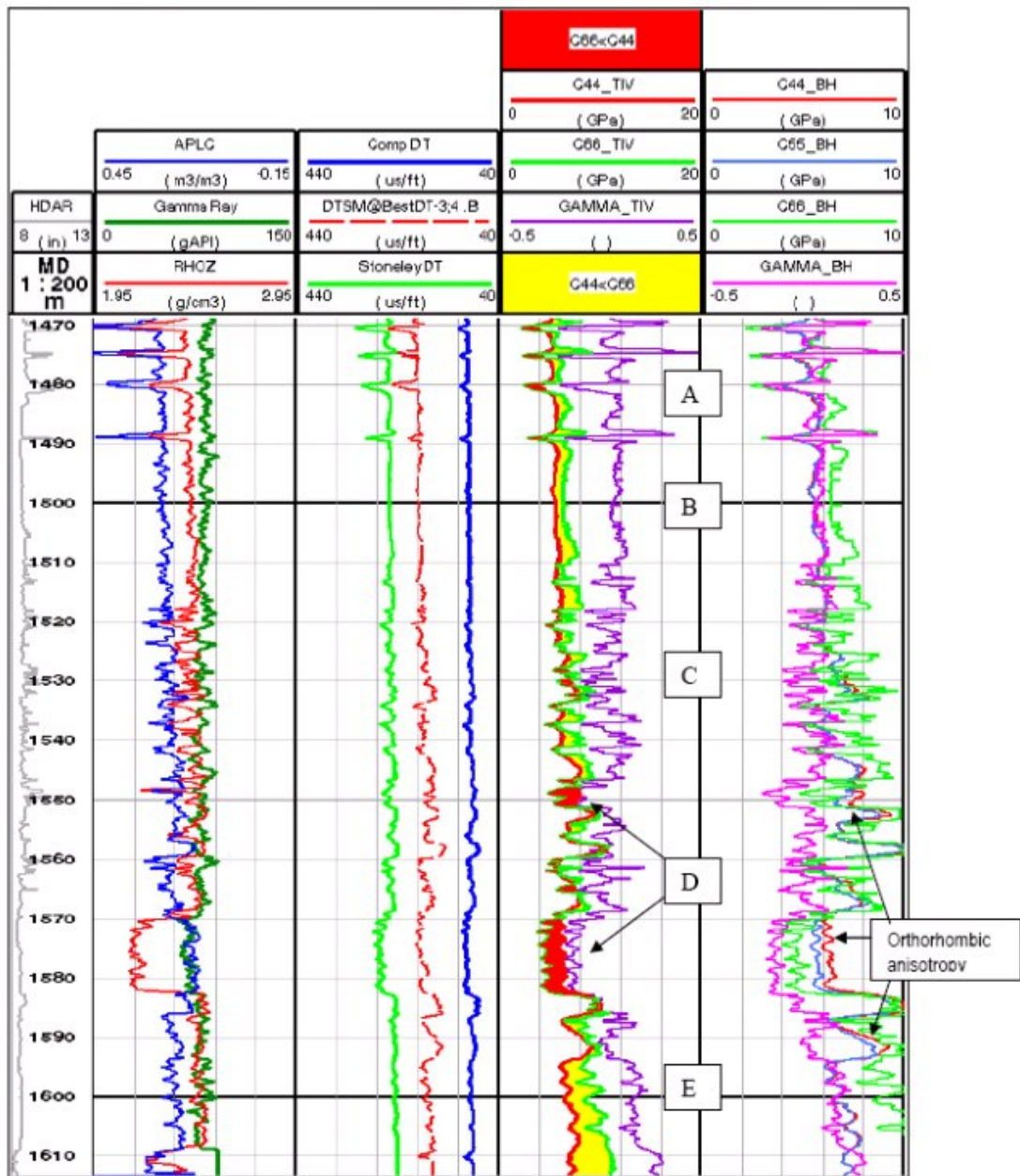


Fig. 3.3.15 Rappresentazione dei risultati del processo di anisotropia 3D: nella colonna 4

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 42 di 94
---	---	--	---------------

sono rappresentati i moduli shear provenienti dal cross-dipole e Stoneley in un mezzo TIV mentre nella colonna 5 sono rappresentati gli shear moduli lungo il foro.

3.3.2.3 Profilo radiale

Un ulteriore analisi fatta riguarda il profilo di velocità attorno all'asse del foro attraverso l'analisi dei dati del monopolo e dipolo.

Per costruire queste "immagini" di velocità vengono utilizzate metodologie diverse per le diverse modalità di acquisizione. Per il dipolo viene utilizzata un inversione delle velocità con diversi campi di lunghezza d'onda (frequenza) mentre per il monopolo viene ricostruito il primo arrivo considerando le differenti spaziature dei ricevitori.

Questi risultati permettono di vedere se sono presenti variazioni di velocità che potrebbero essere dovute a vari fattori quali l'alterazione della formazione.

Nel caso del dipolo l'algoritmo utilizzato fornisce variazioni radiali degli shear moduli C44 e C55 nei due piani ortogonali usando la dispersione dello slow e fast shear di un pozzo verticale parallelo a X3. La differenza tra il profilo radiale dello shear orizzontale (proveniente dall'onda Stoneley) e quello verticale possono essere utilizzati come indicatori di zone compatte o di danneggiamento

Per evitare false indicazioni riguardo all'alterazione attorno al foro è necessario usare molta attenzione nella stima della velocità del fango che risulta essere uno dei parametri più critici.

Qui di seguito vengono riportati i risultati del processo. In Fig. 3.3.16 è rappresentato l'intervallo 1440-1500 m dove si vede come il risultato sia influenzato dalle cattive condizioni del foro (area cerchiata). Osservando il cross plot frequenza verso Dt, la curva di dispersione mostra un trend di diminuzione del Dt rispetto all'aumento della frequenza contrariamente a quanto dovrebbe succedere (diminuzione del Dt al diminuire della frequenza). Questo comportamento sembrerebbe legato alle condizioni del foro e non a un reale cambiamento radiale di velocità della formazione.

Nella Fig. 3.3.17 che rappresenta l'intervallo 1500-1555 m si nota un alterazione di circa 5-6" nella formazione mentre nella Fig. 3.3.18 (intervallo 1545-1590 m) si nota una l'alterazione di circa 6" nelle sabbie a gas.

In tutte le figure illustrate in colonna 6 sono rappresentati i risultati ottenuti dal calcolo di Dt non da STC (Slowness Time Coherence) ma da un processo di inversione (SPI) per ottenere un profilo radiale più corretto. Questa inversione usa dei parametri di max e min frequenza a bassa frequenza per calcolare il Dt e la dispersione della forma d'onda iniziale ed è suggerita quando la formazione non è isotropo-omogenea.

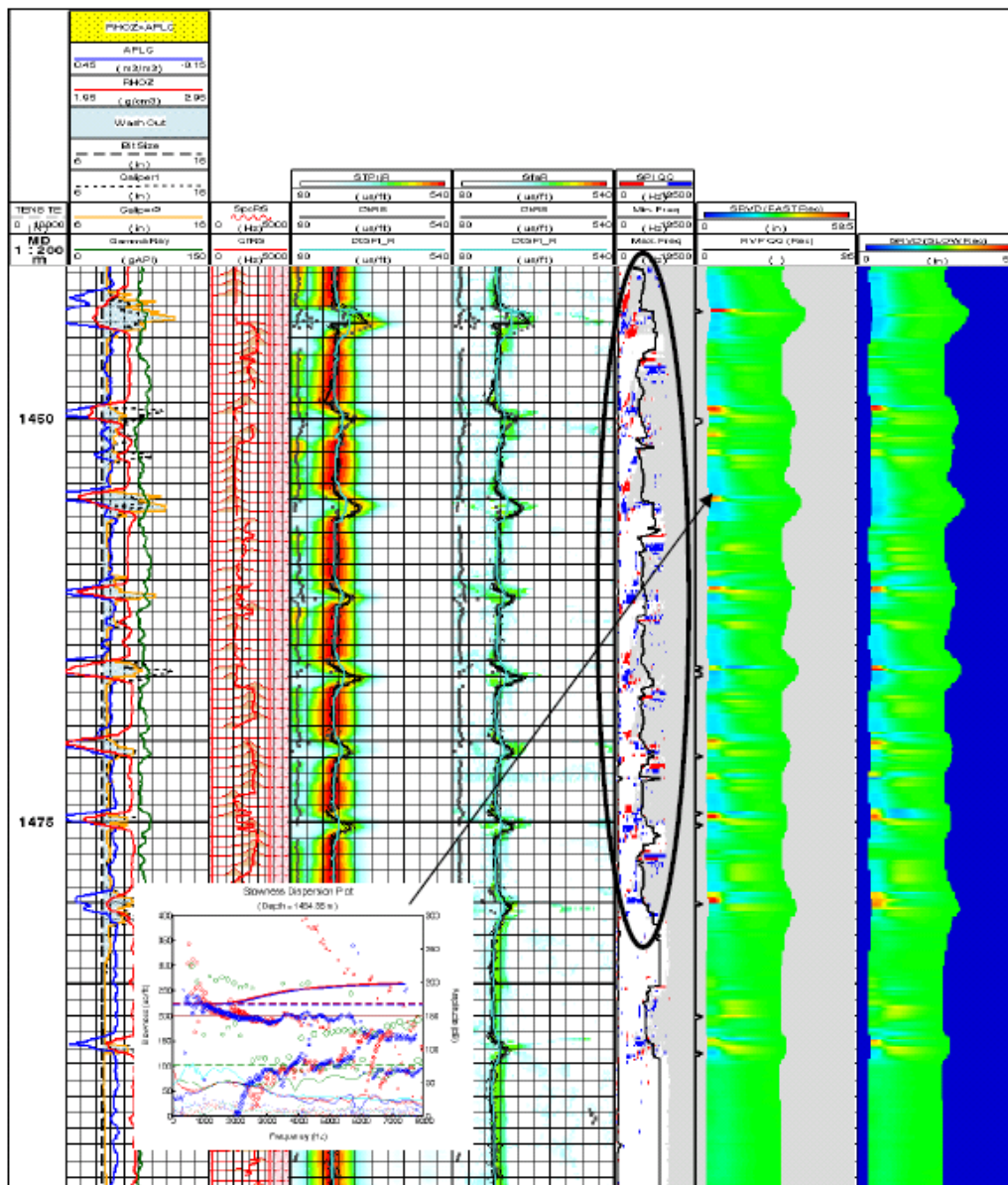


Fig. 3.3.16 Intervallo 1440-1500 m. Rappresentazione dei risultati del profilo radiale del dipolo: colonna 6 risultato del processo SPI dove l'area bianca rappresenta risultati attendibili mentre i punti blu e rossi la variazione della dispersione del fast e slow shear. In colonna 7 e 8 sono rappresentate le variazioni radiali di Dt dalle pareti alla formazione.

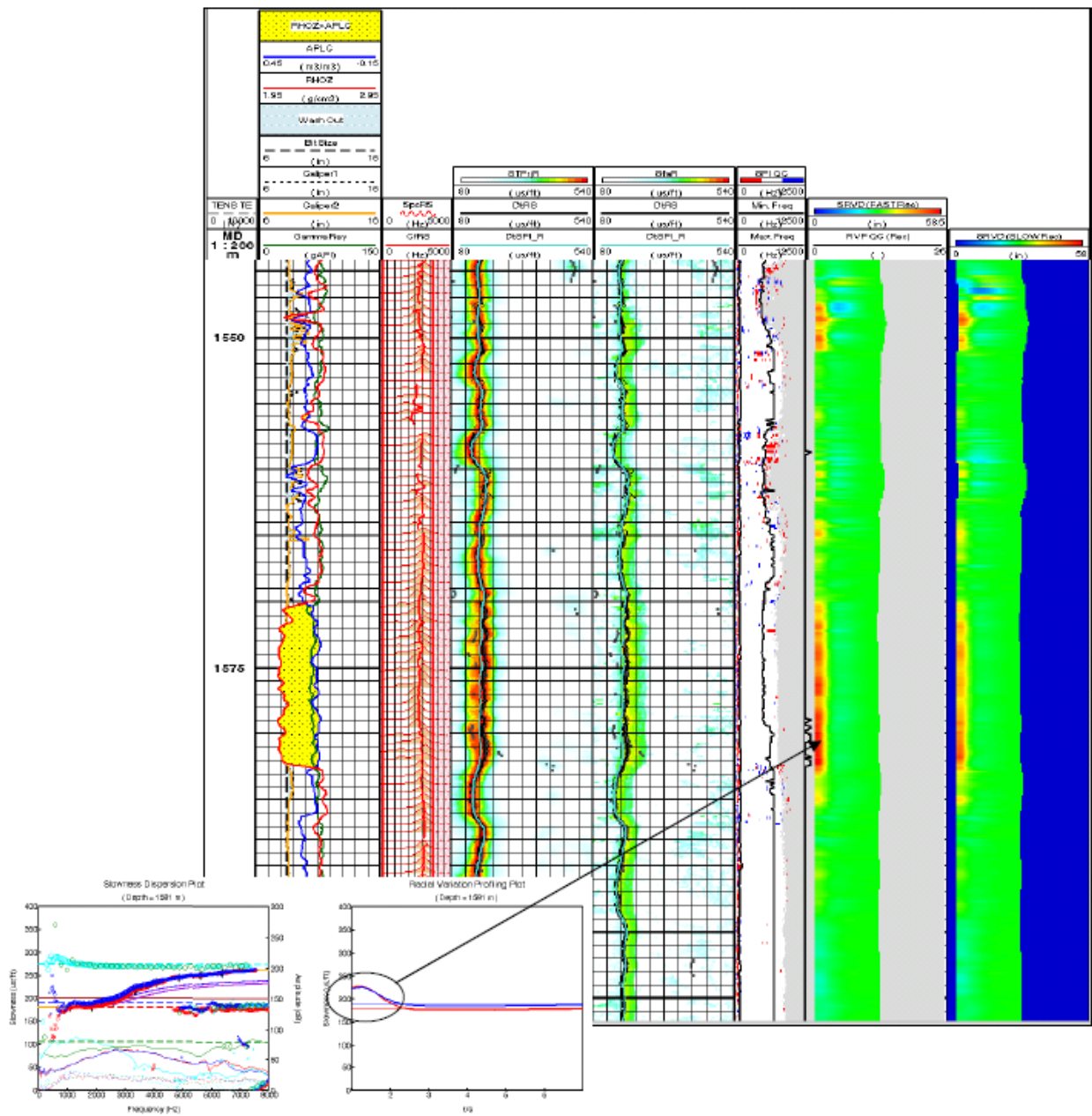


Fig. 3.3.18 Intervallo 1545-1590 m. Rappresentazione dei risultati del profilo radiale del dipolo: colonna 6 risultato del processo SPI dove l'area bianca rappresenta risultati attendibili mentre i punti blu e rossi la variazione della dispersione del fast e slow shear. In colonna 7 e 8 sono rappresentate le variazioni radiali di Dt dalle pareti alla formazione.

Nel caso del monopolo la variazione di velocità attorno al foro è calcolata in modo geometrico utilizzando un algoritmo (basato sullo schema dei raggi di percorso delle forme d'onda) che converte le differenze di tempo di transito tra i ricevitori come funzione della distanza trasmettitore-ricevitore in un profilo radiale. E' possibile definire un profilo radiale di velocità dal monopolo solo quando il valore di Dt compressionale vicino al foro è maggiore di quello nella parte più lontana della formazione per cui la presenza di alterazione non può essere definita nelle zone a gas dove il filtrato del fango invade le vicinanze del foro. In Fig. 3.3.19 sono riportati i risultati dell'intervallo 1440-1610 m, dove si evidenziano dei livelli

alterati corrispondenti a quanto visto nel profilo radiale del dipolo. Non si notano evidenze di alterazione nel livello a sabbie a gas a causa della presenza dell'invasione del fango.

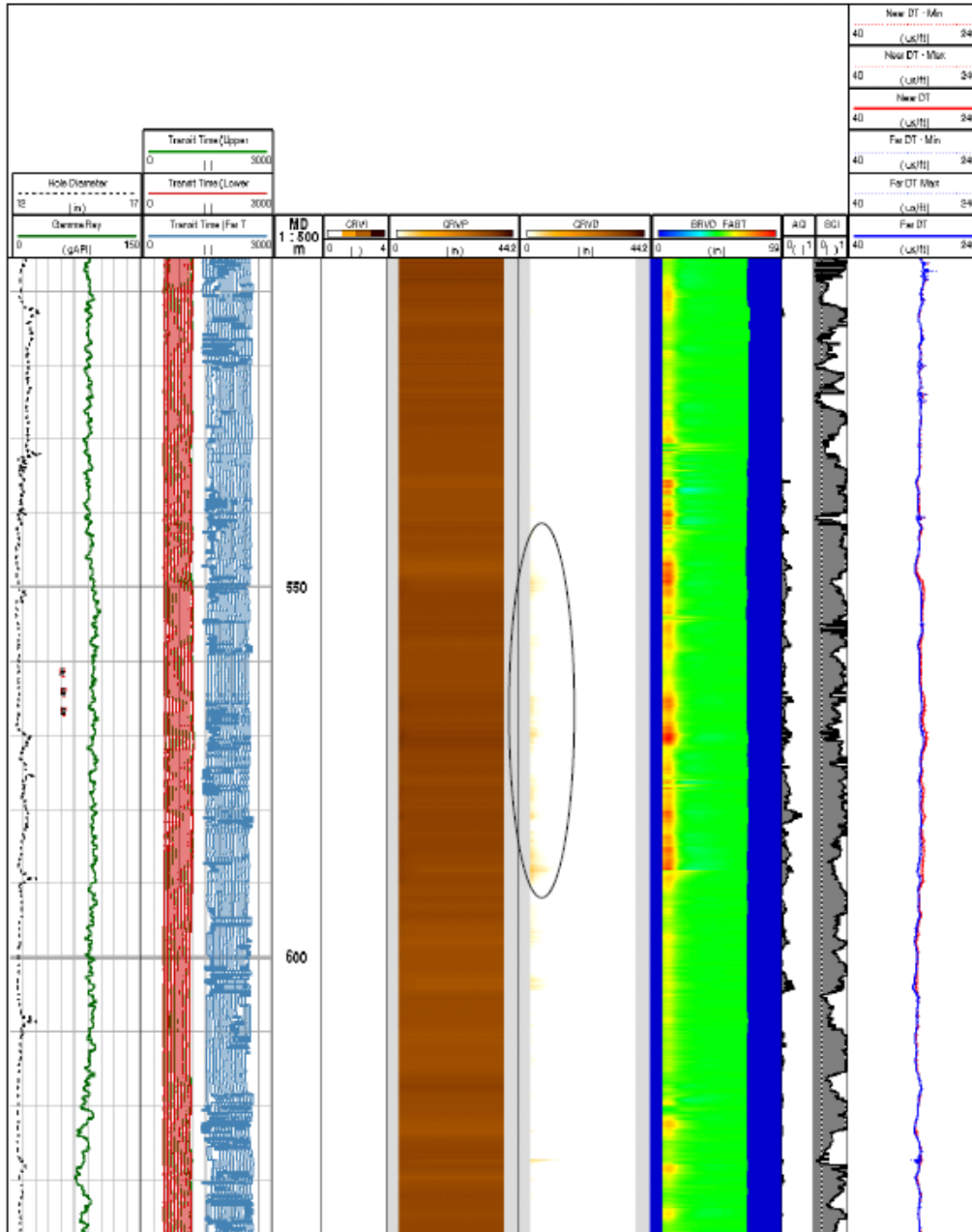


Fig. 3.3.19 Intervallo 1440-1610 m. Rappresentazione dei risultati del profilo radiale del monopolo: colonna 5 risultato del processo SPI dove l'area bianca rappresenta risultati attendibili mentre i punti blu e rossi la variazione della dispersione del fast e slow shear. In colonna 7 e 8 sono rappresentate le variazioni radiali di Dt dalle pareti alla formazione.

3.3.2.4 Permeabilità dell'onda Stoneley

La registrazione delle onde Stoneley in modalità low frequency è stata utilizzata per il calcolo della permeabilità

In questo caso l'onda Stoneley viene analizzata considerando il suo slowness e la sua attenuazione. In un pozzo che attraversa sedimenti impermeabili lo slowness della onda Stoneley è strettamente legato alle caratteristiche meccaniche della formazione, alla densità del fango e al raggio del foro. Quando attraversa una formazione permeabile l'onda Stoneley rallenta e si attenua. Il modulo interpretativo utilizzato, in accordo con la teoria di Biot, usa delle equazioni che descrivono il movimento del fluido in rocce porose a varie frequenze soniche. Le variabili prese in considerazione sono correlate a:

- Proprietà del fango: slowness, attenuazione intrinseca e densità
- Rigidezza e spessore del mud cake
- Proprietà della formazione: velocità delle onde shear, densità e porosità
- Modulo elastico della formazione
- Densità del fluido nei pori e suo modulo elastico

Attraverso un'inversione viene calcolata la permeabilità in modo da minimizzare il contributo dell'errore delle variabili coinvolte. Il risultato è associato ad una barra di errore che descrive la finestra dei valori calcolati con un'attendibilità che via via decresce allontanandosi dal risultato centrale.

La permeabilità viene calcolata usando come riferimento una viscosità del fluido pari a 1 centi-Poise per cui è più esatto parlare di "mobilità del fluido".

Le variabili più sensibili sono l'attenuazione del fango (ATTMUD) e lo slowness del fango (DTMUD).

Qui di seguito la tabella dei parametri utilizzati per il processing della mobilità da onde Stoneley.

Stoneley Mobility model parameters	
Mud slowness ($\mu\text{s}/\text{ft}$)	200
Mud attenuation (dB)	1.5
Fluid density (g/cm^3)	1
Pore fluid modulus (BMKF) (GPa)	2.238
Grain bulk modulus (BMKS) (GPa)	35
Mudcake thickness (cm)	0.45
Mudcake Membrane Stiffness (GPa/cm)	5
Mud Density	1.32
Caliper input	HCAL
Density input	RHOZ
Compressional input	DTCO
Shear input	DTSM_FAST
Porosity input	PGIE (provided by ENI)

Il processo di inversione, applicato nell'intervallo 1560-1600 m, ha prodotto una curva di mobilità da Stoneley qui di seguito riportata (Fig. 3.3.20).

Nella traccia 1 sono riportate le curve di GR (verde), CALI (blu tratteggiato), Density (rosso continuo), porosità efficace (nero continuo); nella traccia 3 Dt Stoneley registrato (verde) e ricostruito (nero), Dt compressionale (blu tratteggiato), Dt shear (rosso tratteggiato); nella traccia 4 la mobilità da

Stoneley (blu) con la sua barra di errore (area grigia) e permeabilità da carote a condizioni ambiente (pallini gialli) e corretta per overburden (pallini rosa). Si vede come rispetto alle carote la curva mostri lo stesso andamento e gli stessi valori assoluti nel tratto a sabbie mentre sia sottostimata nell'intervallo sopra.

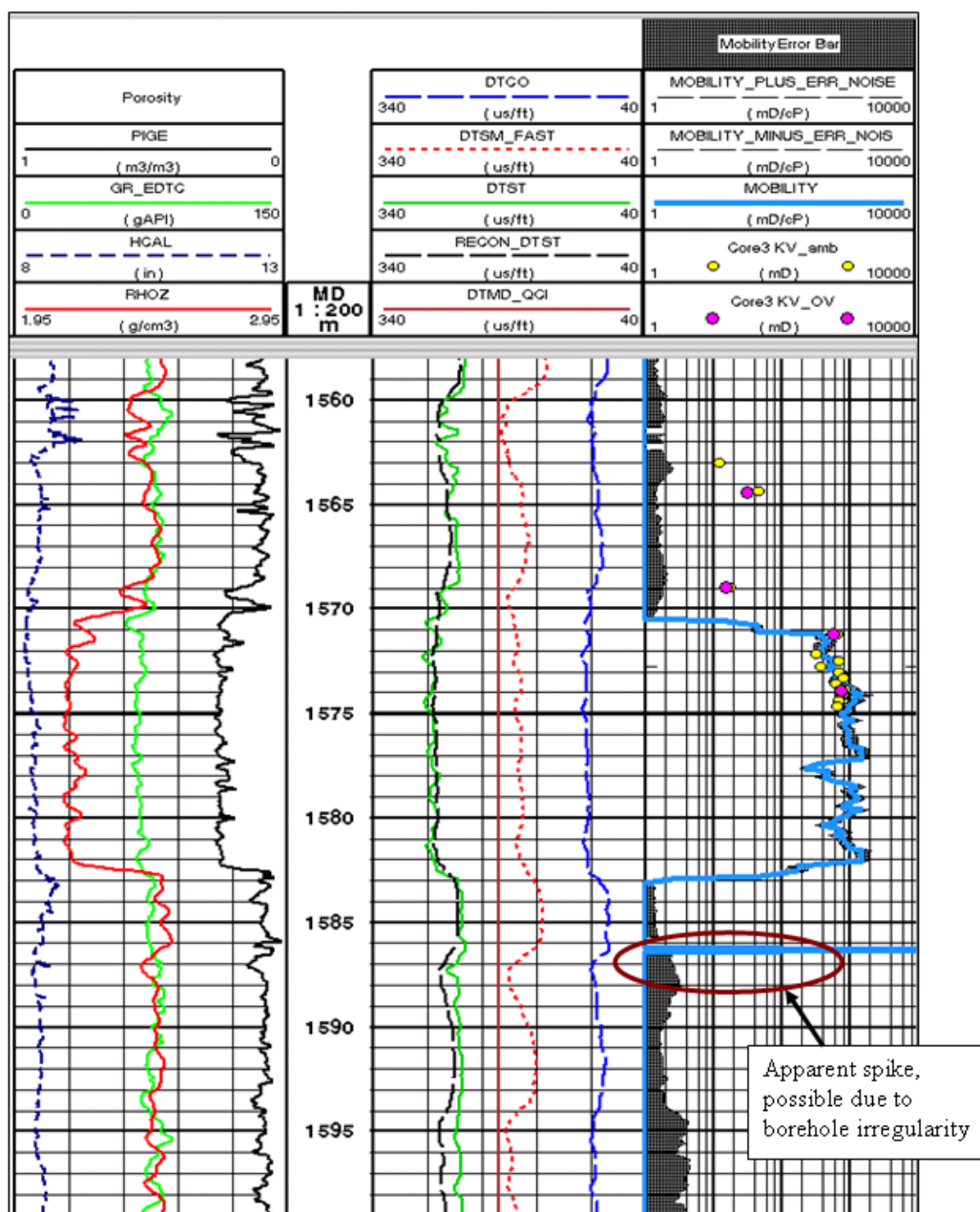


Fig. 3.3.20 Display finale del processing della mobilità da onda Stoneley (quarta traccia, curva blu).

3.3.3 Risultati

- La qualità dei dati acquisiti con l'attrezzo SonicScanner risulta buona in entrambi i run e per tutte le forme d'onda provenienti dalla sorgente Monopolare, Dipolare e Stoneley. Unica eccezione un breve intervallo nel

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 49 di 94
---	---	--	---------------

run 12.25" dove l'arrivo l'onda Stoneley diventa debole a causa del foro scavato.

I dati raw sono stati poi utilizzati per le seguenti interpretazioni: anisotropia delle onde shear e anisotropia 3D, permeabilità da onde Stoneley e profilo radiale delle velocità proveniente dalla sorgente dipolare e monopolare.

- I risultati del processo dell'anisotropia delle onde shear hanno mostrato generalmente assenza/bassissima presenza di anisotropia eccetto da 1530 a 1600 m in corrispondenza del reservoir. L'origine di questa anisotropia è di tipo intrinseco (presenza di bedding o microstrutture allineate).
- L'analisi dell'anisotropia 3D che, come precedentemente descritto, va considerata con molta cautela, indica un'anisotropia TIV (legata a bedding come si vede anche da immagini FMI) nella parte argillosa dell'intervallo considerato mentre nella parte bassa del reservoir si nota un effetto di permeabilità sull'onda Stoneley.
- Il profilo di velocità delle onde shear attorno al foro mostra un'alterazione di circa 5" nell'intervallo compreso tra 1547-1552 m e un'alterazione di circa 6" nelle sabbie a gas dove non si vede nessuna alterazione dal punto di vista delle velocità delle onde provenienti dal monopolo a causa dell'invasione del filtrato del fango.
- L'analisi delle onde Stoneley nel reservoir (1570-1583 m) mostra lo stesso andamento e lo stesso valore assoluto dei dati di carota mentre poco sopra (15760-1570 m) il valore Stoneley è sottostimato rispetto a quello da carote.

3.3.4 Presentazione

I risultati dei vari processi sono rappresentati negli allegati che rappresentano i due differenti run acquisiti:

Ripalta_63Dir_3D_Anisotropy_1430_1600m_200.pds
Ripalta_63Dir_3D_Anisotropy_305_1455m_200.pds
Ripalta_63Dir_Composite_run1_200.pds
Ripalta_63Dir_Composite_run1_200.pds
Ripalta_63Dir_StoneleyMobility_1490_1600m_200.pds

In particolare negli allegati che riassumono tutti i prodotti la legenda di presentazione è la seguente:

- Traccia 1: Min e Max cross energy
- Traccia 2: tool azimuth (blu), gr (verde), caliper (giallo-nero), deviazione del tool (rosso)
- Traccia 3: fast shear azimuth (rosso)
- Traccia 4: fast (rosso) + slow (blu) Dt shear, time anisotropy (da destra a sinistra), slowness anisotropy (da sinistra a destra)
- Traccia 5: rotated fast (rosso) e slow (blue) waveforms
- Traccia 6: slowness frequency projection of dispersion curve di Dt fast
- Traccia 7: slowness frequency projection of dispersion curve di Dt slow
- Traccia 8: Dt Stoneley (verde), shear (rosso) e compressional (blu)
- Traccia 9: Dt far (rosso) e Dt near (blu) dal profilo radiale compressionale

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 50 di 94
---	---	--	---------------

Traccia 10: dipole radial profile da fast shear

Traccia 11: dipole radial profile da slow shear

Traccia 12: monopole Stoneley radial profile

Traccia 13: 3 D anisotropy, C66 vs C55, C44

Traccia 14: absolute compressional slowness vs profondità radiale

Traccia 15: radial slowness difference vs far field

Traccia 16: Dt compressional near (blu) e far (nero)

Traccia 17: gr (verde), density (rosso), neutro porosity (blu)

Traccia 18: AIT resistivities

Traccia 19: profondità e deviazione foro.

3.4 Analisi petrofisica

3.4.1 Controllo di qualità

Il foro mostra generalmente un profilo regolare nelle zone reservoir mentre è affetto da frequenti scavernamenti nelle zone argillose, ad eccezione di alcuni intervalli come, principalmente, 1490-1505 m MD (nelle argille di copertura) e 1585-1608 m (nelle argille intercalate alle sabbie reservoir).

Tutti i log di interesse per l'analisi petrofisica (resistività, density, neutron, pef, sonico e risonanza magnetica) risentono, in modo più o meno evidente, delle irregolarità della parete del foro.

La curva del potenziale spontaneo è poco attiva a causa del modesto contrasto di resistività tra l'acqua di formazione (salinità: 37 g/l) e il filtrato del fango (salinità: 46.6 g/l).

La curva del GR, anch'essa poco attiva, non dà indicazioni litologiche correlabili alla risposta density-neutron.

Le correzioni ambientali sui log sono state applicate in cantiere.

Tutti i log sono stati messi in profondità rispetto al GR del run di acquisizione della resistività.

3.4.2 Modello petrofisico

Il modello petrofisico è stato definito integrando le informazioni derivanti da analisi mineralogiche (diffrattometria di raggi-X), masterlog e crossplot litologici neutron-density.

In tale modello la matrice solida è suddivisa in tre fasi: *clay*, *silt* e *sand*, le cui caratteristiche riflettono le composizioni derivate dalle analisi mineralogiche. Pertanto, la *clay* è costituita prevalentemente da smectite e in misura minore da illite più piccole quantità di clorite e caolinite, il *silt* è costituito in prevalenza da calcite e dolomite e la *sand* è formata prevalentemente da quarzo, in misura minore da albite e poco ortoclasio. Inoltre, la *clay* delle argille di copertura è risultata essere più smectitica rispetto a quella delle argille sottostanti intercalate agli intervalli reservoir.

Sulla base di tali composizioni e in accordo con i crossplot litologici neutron-density (figg. 3.4.1 e 3.4.2) sono stati definiti i parametri di input al modello petrofisico, sintetizzati in tabella 3.4.1.

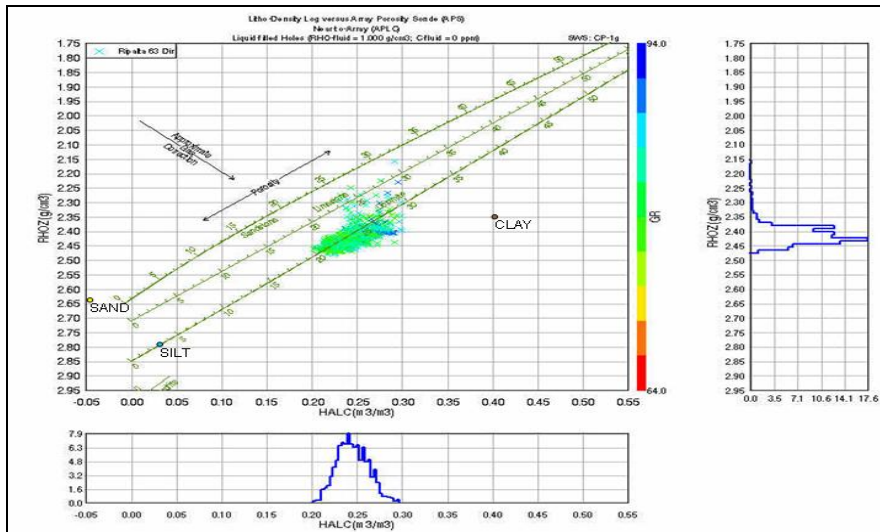


Fig. 3.4.1 Crossplot neutron-density. Argille di copertura: intervallo 1440-1517 m MD.

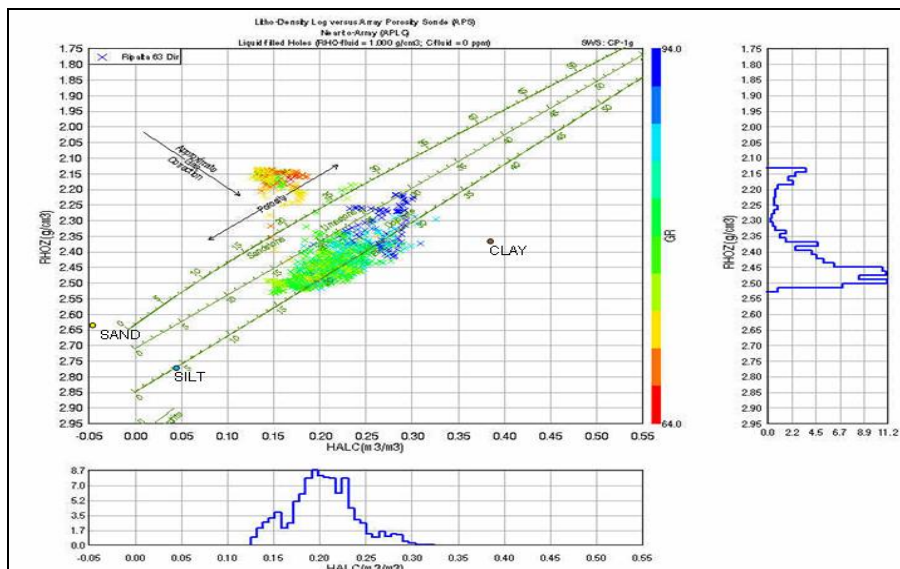


Fig. 3.4.2 Crossplot neutron-density. Reservoir + argille intercalate: intervallo 1440-1517 m MD.

	CLAY	SILT	SAND
Argille di copertura			
DEN (g/cm ³)	2.35	2.80	2.63
NEU (m ³ /m ³)	0.40	0.003	-0.043
RT (ohmm)	2		
WCLP (m ³ /m ³)	0.30		
Reservoir + argille intercalate			
DEN (g/cm ³)	2.37	2.77	2.63
NEU (m ³ /m ³)	0.39	0.005	-0.043
RT (ohmm)	3		
WCLP (m ³ /m ³)	0.28		

Tab. 3.4.1: Parametri di analisi.

I log utilizzati in input per l'analisi sono:

Canale		Log
RHOB	>	RHO8
NPHI	>	HALC
RT	>	RT
EX1	>	VSH da density-neutron

Il valore considerato per la salinità dell'acqua di formazione (fornito da STOGIT) è pari a 37 g/l NaCl eq.

La curva di temperatura, calcolata sulla base della BHT, ha un gradiente pari a 1.94°C/100m. I valori di resistività dell'acqua usati nell'analisi sono stati determinati associando alla salinità la curva di temperatura.

Il filtrato del fango considerato per il calcolo dei parametri della zona invasa ha resistività di 0.14 ohmm @ 24°C e 0.084 ohmm @ 55°C, corrispondenti a una salinità media di circa 46.6 g/l NaCl eq.

I parametri RHOB – NPHI degli idrocarburi sono stati calcolati considerando un gas (metano) con una densità di circa 0.12 g/cm³ (a condizioni medie di pressioni e temperature).

Per il calcolo della saturazione in acqua nella zona invasa è stata utilizzata una formula statistica tale che il volume di idrocarburo della zona invasa è pari al 50% di quello della zona vergine.

Per il calcolo della saturazione in acqua nella zona non invasa è stata utilizzata l'equazione *Indonesia*, con i parametri $a = 1$, $m = 1.84$, $n = 1.49$ (determinati da *special core analysis*); $\alpha = 1.0$, $\beta = -1.5$.

3.4.3 Risultati

L'analisi petrofisica è stata eseguita integrando i dati log con i risultati delle misure e analisi su carote (RCA, SCAL, diffrazione di raggi-X) e le informazioni da masterlog. Nel modello ottenuto, mostrato nell'allegato Composite log – CPI, si distinguono degli intervalli reservoir intercalati ad intervalli argillosi, passanti verso l'alto alla copertura argillosa. Negli intervalli scavernati, a causa delle anomalie presenti su tutti i log disponibili, il modello non può considerarsi valido. Tali intervalli sono evidenziati dalla presenza di una flag rossa nella traccia 11 del composite.

L'intervallo reservoir principale è quello posto alle profondità 1570-1582.5 m MD. Tale intervallo risulta essere sabbioso-siltoso, con porosità effettive medie del 25% e saturazioni medie in acqua (SUWI) intorno al 20%. Il confronto con i dati di laboratorio mostra che le porosità effettive determinate su carota e corrette per l'effetto overburden (CPOR_ovb) sono in accordo con quelle calcolate da log (traccia 11). Inoltre, i valori di grain density (CGDN, traccia 4) sono coerenti con la densità media attribuita alle fasi costituenti la matrice solida. Il confronto, invece, con i dati di risonanza magnetica (par. 3.4.5) mostra che la relativa porosità effettiva (CMRP_3MS) è mediamente in accordo con quella del CPI mentre il volume di acqua capillare (CAPBW, traccia 11) è inferiore al volume di acqua da CPI presente nello spazio poroso oltre al gas, indicando presenza di acqua libera. Tale evidenza risulta anche dal confronto (traccia 10) della curva di

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 53 di 94
---	---	--	---------------

saturazione in acqua da CPI (SUWI) con quella di saturazione in acqua irriducibile da NMR (SWI), quest'ultima sempre più bassa.

L'intervallo reservoir posto tra circa 1609 e 1621 m MD, riconoscibile in tutta la sua estensione da NMR, è stato analizzato solo nella sua parte superiore, fino a 1613 m, essendo questa la profondità corrispondente al primo dato valido di neutron. Questo reservoir risulta essere più siltoso rispetto al precedente, intendendo per siltoso la presenza di una matrice più pesante ossia, nello specifico, più carbonatica. La porosità, anche in questo caso, è mediamente del 25% ma con una maggiore variabilità. La saturazione in acqua è tra il 60 e l'80%. Il confronto con i dati NMR mostra una differenza nelle curve di porosità dovuta ad una probabile sottostima di quella ottenuta da risonanza magnetica (paragrafo dedicato: 3.4.5). Le curve SUWI ed SWI evidenziano presenza di acqua libera.

Per quanto riguarda le caratteristiche della copertura, questa risulta essere prevalentemente argilloso-siltosa. Considerando la natura carbonatica del silt rappresentato, l'insieme clay-silt è anche indicativo della presenza di una componente marnosa. La porosità effettiva è mediamente del 10% e, escludendo le zone affette da scavarnamenti del foro, mostra un discreto accordo con i dati da carota. Talvolta la porosità da carota è più alta del dato log, la discordanza potrebbe essere dovuta alla presenza di sottili livelletti più sabbiosi non risolvibili da log. Il confronto con la porosità effettiva da NMR mostra un buon accordo. L'acqua presente nei pori sembra essere prevalentemente di tipo irriducibile (CAPBW molto prossima a CMRP_3MS).

3.4.4 Presentazione

I risultati dell'interpretazione sono presentati nel Composite log - CPI allegato in scala 1:200. I dati presentati sono i seguenti:

Traccia 1: bit size (BS), caliper (HDAR, HCAL, C1 e C2), potenziale spontaneo (SP), gamma ray (GR_EDTC, GR).

Traccia 2: profondità in m MD.

Traccia 3: array di curve di resistività con risoluzione verticale di due piedi e relativa curva di resistività corretta per l'invasione (RT), permeabilità orizzontale e verticale da carota corretta per l'effetto overburden (CKH_ovb e CKV_ovb), permeabilità da risonanza magnetica (KTIM).

Traccia 4: density (RHO8), density correction (HDRA), neutron (HALC), effetto fotoelettrico (PEF8), grain density orizzontale e verticale da carota (CGDN_Ho e CGDN_Ver).

Traccia 5: sonico compressionale (DTCO) e *shear* (DTSM).

Traccia 6: NMR: distribuzione del tempo di rilassamento del segnale (T2_DIST).

Traccia 7: NMR: porosità totale (DMRP), porosità effettiva (CMRP_3MS) e volume di fluido libero (CMFF), corretti per l'effetto gas.

Traccia 8: intervalli formazionali.

Traccia 9: intervalli carotati.

Traccia 10: saturazione in acqua effettiva da CPI (SUWI) e saturazione in acqua irriducibile da risonanza magnetica (SWI).

Traccia 11: porosità effettiva da CPI e volumi dei fluidi presenti, porosità effettiva da NMR (CMRP_3MS), volume di acqua capillare da NMR (CAPBW),

porosità effettiva orizzontale (CPOR_ovb in blue) e verticale (CPOR_ovb in verde) da carota corretta per l'effetto overburden, flag di *badhole*.

Traccia 12: volumi delle fasi solide e fluide da CPI.

3.4.5 Interpretazione NMR

Il log **CMR Plus** è stato acquisito nell'intervallo 1437 – 1625 m MD con una sezione ripetuta tra 1538 e 1624 m MD, i parametri di acquisizione sono quelli sotto elencati.

Il controllo dei parametri ha confermato che, utilizzando la velocità di registrazione scelta, in presenza di intervalli quarzosi ad acqua sarebbe avvenuta una polarizzazione totale. In presenza, invece, di intervalli siltosi di natura carbonatica, come evidenziato dal CPI tra 1608.5 e 1613 m MD, il grado di polarizzazione rimane dubbio. Il calcare e la dolomia, infatti, hanno una rilassività più bassa del quarzo, e quindi un rilassamento più lento. Con un tempo di polarizzazione di soli 4.6 s è possibile che non tutta l'acqua presente in quest'intervallo sia stata polarizzata, col conseguente rischio di una sottostima della porosità. Di fatto, il confronto tra la porosità da NMR e quella da CPI in questo intervallo evidenzia come la prima mostri valori più bassi. Il tempo di polarizzazione utilizzato, inoltre, non era sufficiente a polarizzare il gas. Questa modalità di acquisizione è quella comunemente impiegata nei campi a gas quando la porosità corretta per la presenza di gas è disponibile da un'altra fonte (es. D/N). Questo perché la polarizzazione del gas penalizza fortemente la velocità di acquisizione del log NMR. Il gas non rilevato fa parte del volume dei fluidi liberi. L'acqua *bound* è invece interamente rilevata. E' importante che tutta l'acqua venga registrata – quella più veloce è il totale dell'acqua *bound* mentre quella più lenta è l'acqua libera. Il volume totale dei fluidi liberi è la differenza tra la porosità da CPI e il volume di acqua *bound*.

Phase	8½"
Drilling fluid	WBM
Acquisition mode	B (no EPM)
Echoes	1800
Polarisation time (s)	4.6
Sampling interval (in.)	6
No. of levels stacked	3
Vertical resolution (in.)	24
Nominal Logging speed (m/h)	338

Dal confronto tra l'acquisizione principale e i dati della sezione ripetuta, si può dire che la sonda ripete bene. Dal controllo dei dati e dei parametri di acquisizione non si rileva alcun problema con i dati, mentre l'esame dei primi echi evidenzia un leggero "ringing" del primo, che, pertanto, è stato escluso dall'analisi.

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 55 di 94
---	---	--	---------------

Tra 1490 m MD ed il top dell'intervallo registrato ci sono degli intervalli di spessore tra 1 e 2 m in cui il tool legge fango, evidenziando così zone di washout (fig. 3.4.3). Il CMR, infatti, ha una profondità di investigazione di solo 1.2" ed è quindi molto sensibile alle condizioni del foro.

3.4.5.1 Risultati


Un forte effetto gas è stato rilevato nell'intervallo 1570 – 1582 m MD. L'NMR è sensibile ai protoni dell'idrogeno presenti nell'acqua e nel gas. Mentre l'acqua ha un indice di idrogeno di uno, quello del gas è inferiore. In presenza di un certo volume di gas il segnale NMR è attenuato rispetto a quello dello stesso volume di acqua. E' possibile risalire alla porosità della roccia usando la curva del density (metodo DMR – Density Magnetic Resonance) insieme alla porosità misurata dall'NMR. Il risultato in questo caso è una porosità corretta per la presenza di gas molto simile a quella calcolata dal metodo density-neutron, il neutron infatti è affetto dalla presenza di gas allo stesso modo dell'NMR, entrambi sono sensibili all'indice di idrogeno. L'NMR, però, ha una profondità di investigazione minore del neutron e quindi è più affetto dall'invasione. Esso dà un'indicazione della presenza di gas in formazione solo se l'invasione non è completa, quindi la saturazione in gas rilevata dall'NMR è sempre sottostimata.

Nella track 5 di figura 3.4.3 sono mostrate le curve NMR senza correzione per l'effetto gas, mentre, nella track 8, il volume del fluido libero è stato corretto. Buon accordo è stato riscontrato tra la porosità ottenuta dal metodo DMR e quella da carota.

La **saturazione in acqua irriducibile** può essere stimata dalle curve di distribuzione T_2 applicando un cut-off al T_2 . L'assunzione, generalmente valida nelle rocce clastiche, è che l'acqua irriducibile (*bound*) è quella che giace nei pori piccoli, cioè nei pori con T_2 basso. L'esperienza acquisita nei giacimenti dell'Adriatico ha portato in passato all'applicazione di un cut-off di 18 ms, leggermente più basso del valore standard usato nelle arenarie. Nel caso specifico, la disponibilità di dati SCAL, Swi in particolare, ha permesso di validare la scelta di tale cut-off. Nella track 6, la Swi da CMR così calibrata è confrontata con i valori di swi da carota (solo quattro campioni sono stati portati ad Swi con successo). Nel caso di tre campioni l'accordo è perfetto. La differenza tra log e carota nel livello sottile alla profondità di 1563.5 m MD è probabilmente legata alla differenza in risoluzione tra le due misure.

Il confronto tra Swi da NMR e la saturazione in acqua da CPI (Suwi) in questo reservoir evidenzia la presenza di un minimo di acqua mobile. Per quanto riguarda la mobilità di quest'acqua, essa dipende dalle permeabilità relative dell'acqua e del gas.

In assenza di dati carota l'applicazione di un cut-off T_2 idoneo per rocce quarzose nel reservoir inferiore (1608.5-1621 m MD) non è scontata. La forma delle distribuzioni e, in particolare, la separazione tra i due picchi (track 7) porta ad ipotizzare che l'acqua *bound* sia rappresentata dal picco a sinistra e l'acqua libera da quello a destra. Il cut-off di 18 ms cade quasi sempre nell'avvallamento tra i picchi e, quindi, può essere usato per stimare il volume di acqua bound.

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 56 di 94
---	---	--	---------------

Nello stesso intervallo erano disponibili anche dati di **permeabilità** da carota. Si è potuto, quindi, calibrare l'equazione Timur-Coates per la stima della permeabilità da log NMR:

$$K = 0.5 * (10 * \text{Por})^3 * (\text{FFI} / \text{BFV})^2$$

Data la scarsa quantità di acqua *bound* presente ad alcune profondità, da cui deriverebbero picchi di permeabilità improbabili, la BFV è stata limitata ad un minimo di 0.02 m³/m³. La curva di permeabilità ottenuta (KTIM) è plottata nell'ultima track della figura 3.5.3.

Le **distribuzioni T₂** nelle due zone reservoir (1570-1582 m (superiore) e 1609-1622 m (inferiore)) presentano due aspetti diversi. Considerando che il reservoir superiore è mineralizzato a gas (sebbene parzialmente invaso da filtrato a base acqua) e quello inferiore è principalmente ad acqua, una differenza nelle distribuzioni è attesa. Grazie alla presenza di acqua, la forma delle distribuzioni nel reservoir inferiore è più rappresentativa della distribuzione dei pori all'interno della formazione. Viceversa, la forma della distribuzione dei pori nel reservoir superiore è mascherata dal gas. Inoltre, l'analisi dei log ha evidenziato differenze nella composizione mineralogica dei due reservoir: più quarzoso quello superiore e più carbonatico quello inferiore, un motivo in più per spiegare le differenze nelle forme delle distribuzioni.

3.5 Prove di sforzo mediante MDT Dual Packer

Le prove di stress sono state realizzate come “MDT Mini-Frac test” utilizzando un dispositivo Dual Packer con lunghezza di un metro. Tale test ha come obiettivo di acquisire il valore di stress orizzontale minimo (S_{hmin}) nell'*overburden*, al fine di definire la pressione massima di reiniezione del gas in giacimento.

Questo tipo di prova si può sostanzialmente considerare una misurazione degli stress basata sulla tecnica di fratturazione micro-idraulica: viene utilizzato il responso di pressione ottenuto durante la formazione, la propagazione e la chiusura di una frattura idraulica.

E' stato fatto scendere uno strumento che utilizza due *pumpout* in combinazione in modo da ottenere una portata di iniezione maggiore rispetto alla configurazione standard che ne prevede uno solo. Questo accorgimento ha permesso di raggiungere la fratturazione prima che prendesse il sopravvento la deformazione plastica.

Il posizionamento delle stazioni MDT è stato deciso analizzando ed integrando tutte le informazioni disponibili per il pozzo, tra cui principalmente:

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

e il più importante per il posizionamento dei packer

- i log UBI con i quali si ottengono ottime indicazioni sulla geometria del foro.

Gli intervalli testati ed i relativi risultati ottenuti di “minimum stress” ad ogni test sono elencati nella Tabella 3.5.1 sottostante.

Test	MDT Top [m]	MDT Bottom [m]	Risultati	Discesa
1	1446.5	1447.5	non raggiunta fratturazione	1
2	1457.8	1458.8	non raggiunta fratturazione	
3	1467.5	1468.5	non raggiunta fratturazione	
4	1474.7	1475.7	non raggiunta fratturazione	
5	1485.3	1486.3	non raggiunta fratturazione	2
6	1488.5	1489.5	non raggiunta fratturazione	
7	1492.5	1493.5	non raggiunta fratturazione	
8	1496.0	1497.0	non raggiunta fratturazione	
9	1474.7	1475.7	non raggiunta fratturazione	3
10	1588.0	1589.0	raggiunta fratturazione, minimum stress in situ 4500 Psia	
11	1594.0	1595.0	non raggiunta fratturazione	
12	1596.0	1597.0	non raggiunta fratturazione	
13	1599.0	1600.0	non raggiunta fratturazione	
14	1604.5	1605.5	non raggiunta fratturazione	
15	1485.0	1486.0	non raggiunta fratturazione	
16	1491.0	1492.0	non raggiunta fratturazione	
17	1600.5	1601.5	non raggiunta fratturazione	
18	1565.0	1566.0	non raggiunta fratturazione	

Tabella 3.5.1 – Intervalli testati con MDT e risultati di “minimum stress” ottenuti.

A 1610 m e 1601 m è stata misurata la pressione dei fluidi di formazione (1601 m: 2245 Psia, 1610 m: 2408 Psia).

In tutti gli intervalli testati non è stata raggiunta la fratturazione ad eccezione di un solo punto in corrispondenza di una frattura naturale preesistente (come osservabile anche da carota) riaperta dal test eseguito nell'intervallo 1588-1589 m MD (nella formazione "Sabbie di Caviaga").

Le immagini FMI acquisite prima e dopo le prove di stress sono visualizzate nelle Figg. 3.5.1, 3.5.2, 3.5.3, 3.5.4. Per tutti gli intervalli di prova le immagini FMI testimoniano che lo stress test non ha prodotto la formazione di fratture indotte, fratture verticali che in generale si sviluppano perpendicolarmente alla direzione di minimo stress a seguito di un eventuale esito positivo del test MDT.

Sono stati testati vari livelli così da analizzare il comportamento di facies differenti all'interno dell'argilla di copertura e del reservoir sottostante. Sono stati analizzati con maggiore attenzione, ripetendo per due volte il test MDT, i livelli ritenuti di particolare interesse geomeccanico: il livello con una frattura naturale a 1485.3-1486.3 m (Fig. 3.2.16) e un livello caratterizzato da elevato scavamento a 1474.7-1475.7 m. In entrambi i livelli le prove ripetute hanno dato esito negativo.

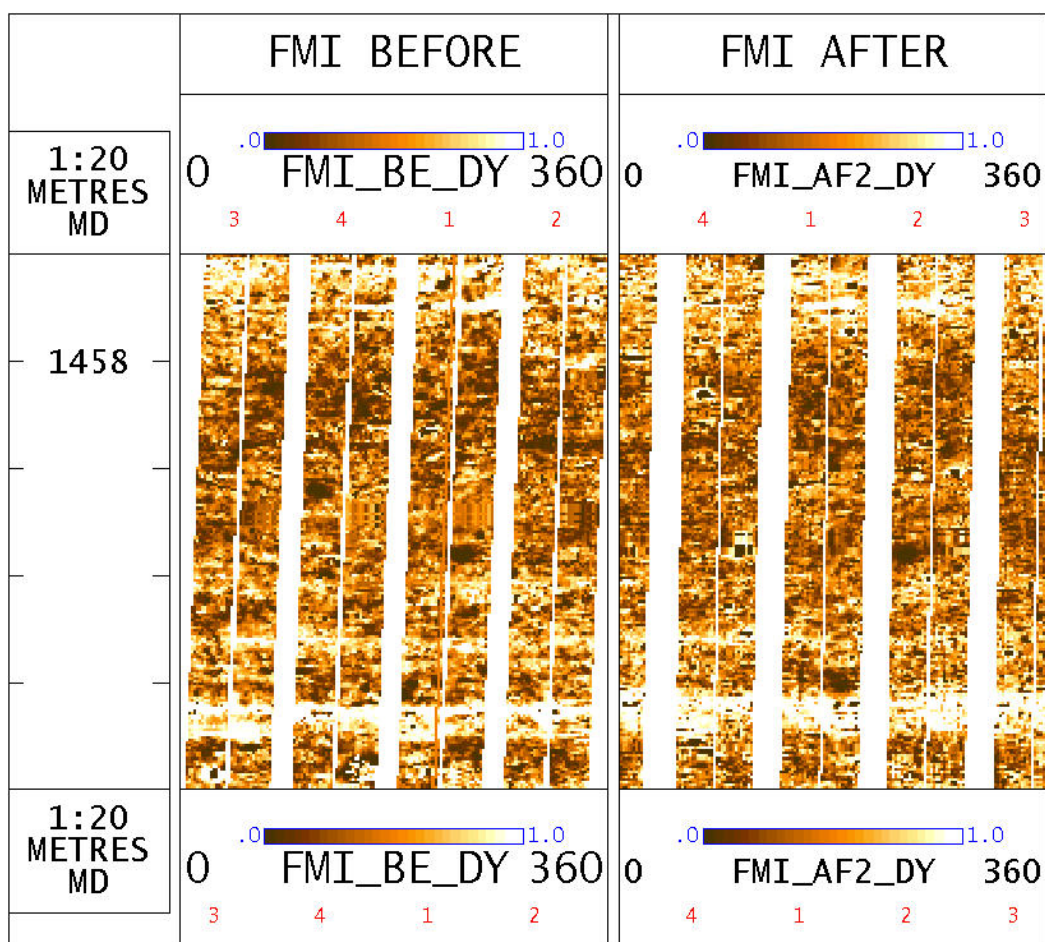


Fig. 3.5.1 – Immagini FMI, prima e dopo lo stress test, in corrispondenza del test MDT eseguito nella prima discesa alla profondità 1457.8-1458.8 m MD (Argille del Santerno).

L'immagine *before stress test* e quella *after stress test* mostrano che non è avvenuta nessuna fratturazione a seguito del test MDT.

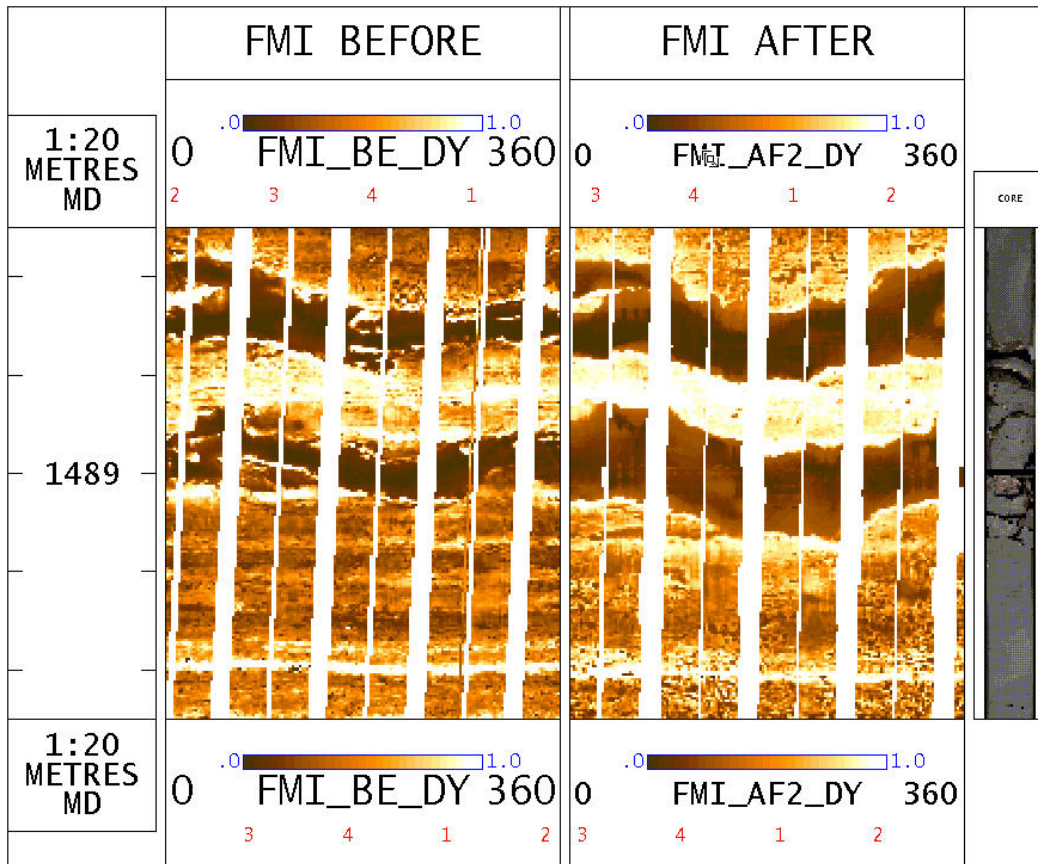


Fig. 3.5.2 – Immagini FMI, prima e dopo lo stress test, in corrispondenza del test MDT eseguito sia nella seconda che nella terza discesa alla profondità 1484.5-1489.5 m MD (Argille del Santerno) in corrispondenza del livello ricco in stiloliti. L'immagine *before stress test* e quella *after stress test* mostrano che non è avvenuta nessuna fratturazione a seguito del test MDT.

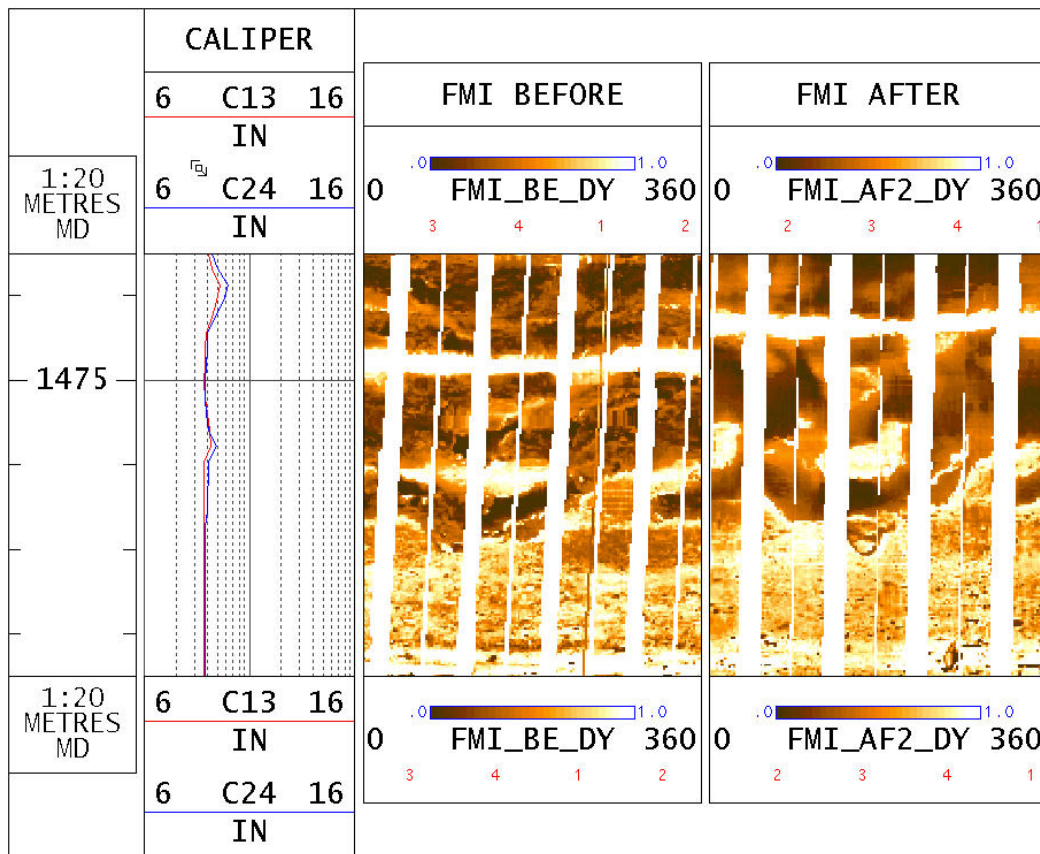


Fig. 3.5.3 – Immagini FMI, prima e dopo lo stress test, in corrispondenza del test MDT eseguito sia nella seconda che nella prima che nella seconda discesa alla profondità 1474.7-1475.7 m MD (Argille del Santerno) in corrispondenza di un livello fortemente scavernato (come evidenziato anche dalle curve caliper a sinistra). L'immagine *before stress test* e quella *after stress test* mostrano che non è avvenuta nessuna fratturazione a seguito del test MDT.

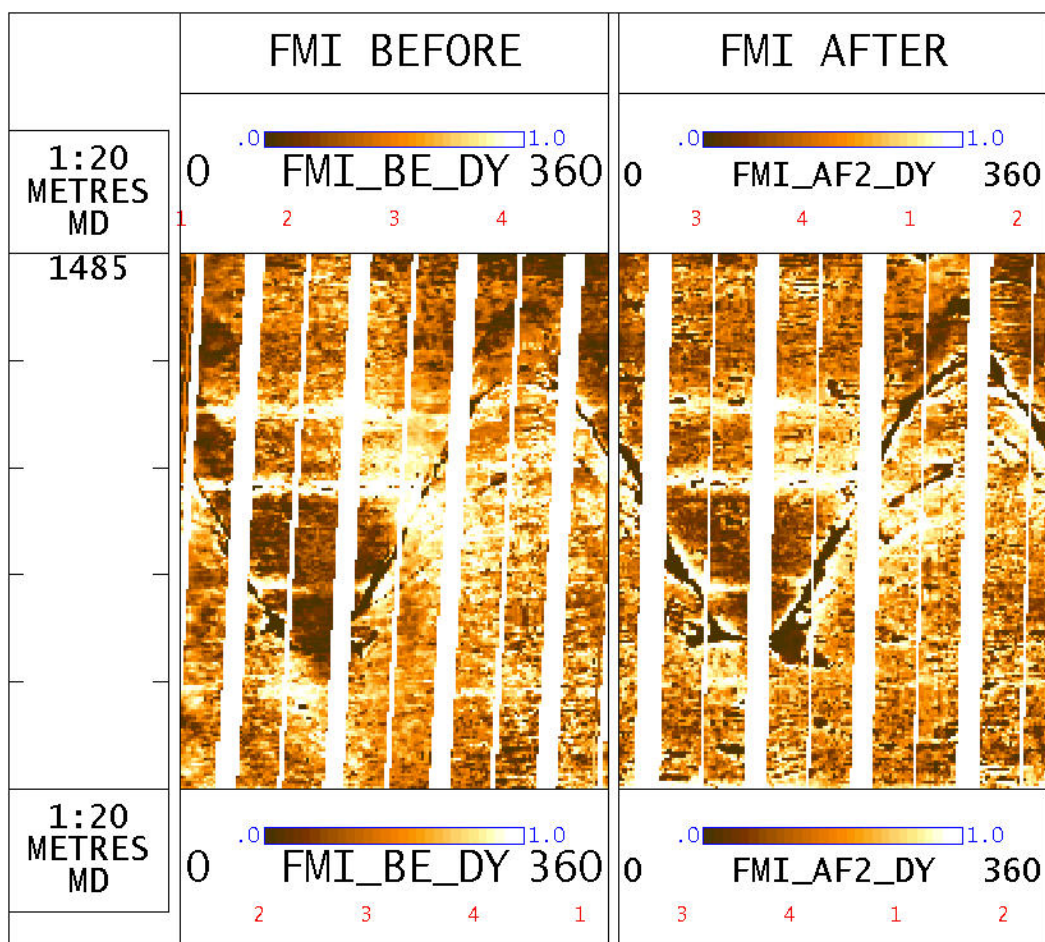


Fig. 3.5.4 – Immagini FMI, prima e dopo lo stress test, in corrispondenza del test MDT eseguito sia nella seconda che nella terza discesa alla profondità 1485.0-1486.0 m MD (Argille del Santerno) in corrispondenza di una frattura ben visibile da FMI. L'immagine *before stress test* e quella *after stress test* mostrano che non è avvenuta nessuna fratturazione a seguito del test MDT.

Da quanto osservato si può concludere che le argille di copertura (Argille del Santerno) mostrano un comportamento francamente plastico poiché non si è mai raggiunta la fratturazione con MDT e non sono state notate né fratture indotte né break out dall'analisi dei log di immagine.

Nell'intervallo 1588.0-1589.0 m MD è stato invece possibile fratturare ed ottenere un dato rappresentativo. Il test si può considerare sufficientemente buono per capire che la frattura è presumibilmente con estensione limitata. (Fig. 3.5.5).

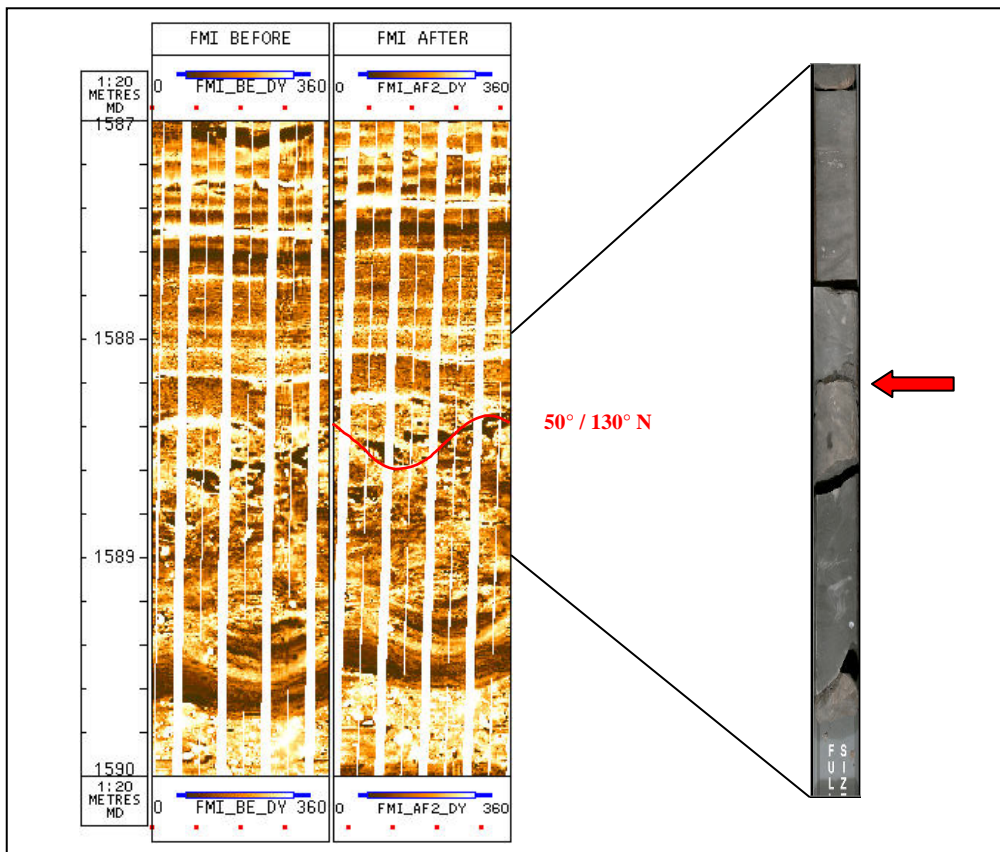


Fig. 3.5.5 – Immagini FMI, prima e dopo lo stress test, in corrispondenza del test MDT eseguito nella seconda discesa alla profondità 1588.0-1589.0 m MD (Sabbie di Caviaga). L'immagine *before stress test* mostra la presenza di una frattura naturale già presente prima del test. L'immagine *after stress test* mostra la frattura aperta dal test MDT ormai richiusa. A destra è possibile vedere indicata dalla freccia rossa la stessa frattura su carota (in rosso sono indicati inoltre dip e azimuth della frattura).

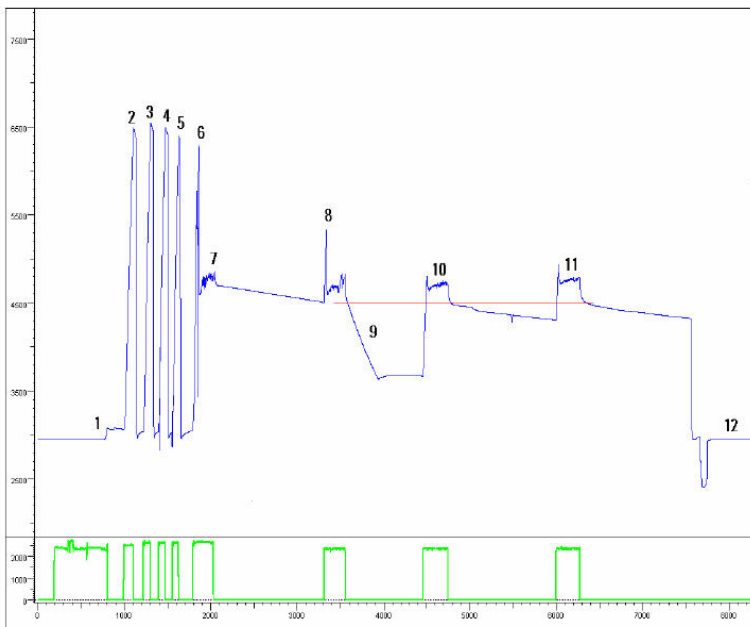
Qui sotto viene riportato il diagramma delle pressioni e delle portate nel corso della prova di sforzo nell'intervallo 1588.0-1589.0 m MD (Fig 3.5.6). All'analisi dei diversi cicli, per ogni prova che ha conseguito fratturazione, si ottiene una buona ripetibilità dei parametri (curva di *fall-off*), che consente di valutare la pressione di chiusura della frattura indotta idraulicamente ("minimum stress"), pari a 4500 Psia. Tale ripetibilità è evidenziata da una linea rossa nel diagramma sottostante. Nella tabella annessa al diagramma sottostante sono riportate le pressioni di fratturazione (*Breakdown Pressure*) e di chiusura (*Closure Pressure*) per ogni singolo ciclo.

Test 1588.5 m. MD

- 1 Inflate packers
- 2 Iniezione no frattura
- 3 Iniezione no frattura
- 4 Iniezione no frattura
- 5 Iniezione no frattura
- 6 Iniezione e frattura
- 7 Propagazione frattura e fall-off
- 8 Ciclo #2 riapertura/propagazione frattura
- 9 Drawdown con Flow Control
- 10 Ciclo #3 riapertura/propagazione frattura/fall-off
- 11 Ciclo #4 riapertura/propagazione frattura
- 12 Deflate Packers

LA LINEA ROSSA RAPPRESENTA LA
PRESSIONE MEDIA DI CHIUSURA
FRATTURA, EQUIVALENTE AL **MINIMUM**
STRESS ESTIMATO 4500 psi

Cycle #	Breakdown Pressure Psi	Closure Pressure Psi
1	6295	4698
2		4474
3		4499
4		4500



Plot pressures(psi) and Pumpout Motor Speed (rpm) vs Time (sec)

Fig. 3.5.6 – Diagramma delle pressioni e delle portate nel corso della prova di sforzo nell'intervallo 1588.0-1589.0 m MD - con lo strumento centrato a 1588.5 m MD (Formazione Argille di Santerno). La linea rossa evidenzia la buona ripetibilità delle pressioni di chiusura. Nella tabella sono riportati i risultati dei vari cicli.

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 65 di 94
---	---	--	---------------

4. ANALISI DATI CAROTE

4.1 Descrizione sedimentologica

La descrizione sedimentologica delle carote 1-2-3-4 del pozzo Ripalta 63DIR è stata commissionata come supporto allo studio petrofisico. In particolare, le carote in esame sono state descritte dopo essere state tagliate per evidenziare meglio le strutture sedimentarie. Per ogni carota, è stata successivamente preparata una tavola riportante, oltre al log sedimentologico, le foto delle carote stesse in tutta la loro lunghezza e alcune altre immagini esemplificative delle litologie e delle strutture osservate (Figg. 4.1.1 – 4.1.4).

Al momento della descrizione, alcune porzioni di carota, lunghe circa 10-20 cm, mancavano in quanto precedentemente campionate per altre analisi. Nella descrizione, questi tratti mancanti sono indicati con un riquadro bianco. Di seguito, le principali caratteristiche delle carote sono descritte in senso stratigrafico, vale a dire dal basso verso l'alto.

1. Carota 4 (1597-1585m; Fig. 4.1.1)

La carota 4 è caratterizzata, dal basso verso l'alto, dai seguenti sette intervalli.

- La base della carota (1597-1594.3m) consiste di argille con intercalazioni centimetriche di arenarie molto fini e massive. La bioturbazione, presente all'interno delle argille, non è omogeneamente distribuita, tendendo a concentrarsi solo lungo alcuni livelli (Foto F1; Fig. 4.1.1).
- Nell'intervallo da 1594.3m fino a 1593.9m sono presenti 3 strati, spessi da 10 a 20cm, di arenaria da fine a molto fine spessi da 10 a 20 cm, mal cerniti e caratterizzati, al loro interno, da clasti, sia angolari sia ben arrotondati, generalmente carbonatici e di diametro inferiore a 0.5cm.
- Da 1593.9m a 1593.7m è presente un'arenaria media massiva, a base erosiva e con possibili strutture da "sand injection" a sua volta sostituito, verso l'alto, da uno strato di arenaria medio fine con fantasmi di lamine oblique.
- L'intervallo successivo, da 1593.7 fino a 1591.4m, consiste in strati relativamente più spessi (da 40 a 80 cm), di arenaria fine massiva, con clasti ancora prevalentemente calcarei, angolari o arrotondati. Sebbene la dimensione dei clasti nei singoli strati non sia omogenea, si osserva che, nel complesso, il diametro medio tende ad aumentare passando dallo strato inferiore verso quello superiore.
- La porzione successiva della carota è caratterizzata da due cicli (1591.2-1590.5m e 1590.5-1588.6m, rispettivamente) con una tendenza "fining upward" evidenziata da arenarie molto fini con piccoli clasti sparsi passanti, verso l'alto, ad argille con sottili intervalli più arenacei e deformati.
- Il penultimo intervallo (1590.5 – 1586.6m) è caratterizzato da argilla bioturbata, nel suo complesso simile a quella già osservata alla base della carota.
- L'ultimo intervallo (1586.6-1585m) consta di due corpi sedimentari costituiti di arenarie fini con clasti il cui diametro varia da meno di 0.5 cm a più di 2 centimetri. In particolare, all'interno di ognuno di questi due corpi sedimentari, i clasti sembrano essere disposti secondo due cicli caratterizzati da una

	Eni S.p.A. Divisione E&P	RIPALTA 63 DIR CARATTERIZZAZIONE PETROFISICA, GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA	Pag. 66 di 94
--	---	--	---------------

diminuzione del diametro medio dal basso verso l'alto. Tale tendenza potrebbe suggerire la presenza effettiva di almeno 4 strati amalgamati due a due.

2. Carota 3 (1575-1563m; Fig. 4.1.2)

Nella carota 3 si possono distinguere tre intervalli principali che descrivono, nel loro complesso, un ciclo "fining upward" caratterizzato da arenarie massive medie (da 1575 a 1571m) passanti a sottili livelli di arenaria fine/molto fine intercalati ad argille e, infine, ad argille nella parte alta.

- In particolare, il primo intervallo (1575-1571m) è costituito da dieci strati di arenaria massiva, mediamente ben cernita. I due strati alla base sono costituiti interamente da arenaria media, mentre i successivi strati mostrano una gradazione da arenarie medie a fini. Alcuni strati sono separati da sottili livelli argillosi, mentre altri sono amalgamati tra loro rendendo difficile, in alcuni casi, il riconoscimento dei singoli eventi deposizionali.

- Nell'intervallo intermedio, (1571-1567.2m circa) si verifica un'inversione del rapporto sabbia/argilla, con sottili strati di arenaria da fine a molto fine (10 cm circa) alternati ad argille (da 10 a 30 cm di spessore) intensamente bioturbate. Tale bioturbazione è riconoscibile anche in alcuni punti dei livelli arenacei.

- L'intervallo sommitale, da 1567.2m a 1563m, rappresenta, probabilmente, la parte più distale rispetto ai sistemi di alimentazione del bacino ed è interamente argilloso, ad eccezione dell'ultimo metro di carota, caratterizzato a sua volta da un'alternanza di sottili strati arenacei molto fini ed argilla.

3. Carota 2 (1495-1483m; Fig. 4.1.3)

La carota 2 è interamente caratterizzata da argilla con bioturbazione più frequente lungo alcuni livelli della carota e più rada in altri. Un unico orizzonte di arenaria media massiva, passante ad arenaria fine/molto fine con laminazioni tipo ripples è stato riconosciuto a 1491.5m. All'interno della carota si osservano due distinte tipologie di fratture.

Il primo tipo di frattura, presente a 1494.2m e a 1448.9m, è caratterizzato da bordi estremamente irregolari (Fig. 4.1.3) che non sembrano essere compatibili con nessuna struttura naturale, sia deposizionale sia post-deposizionale. In generale potrebbero essersi formate durante le operazioni di estrazione della carota stessa. Nella parte alta della carota, al contrario, è presente una serie di fratture ad alto angolo e strie lungo la superficie, compatibili con dei piani di scivolamento.

4. Carota 1 (1452-1440; Fig. 4.1.4)

La carota 1, analogamente alla carota 2, è completamente costituita da argilla. Anche in questo caso sono presenti rare bioturbazioni concentrate lungo alcuni intervalli ed un unico sottilissimo intervallo arenaceo, a 1448.6m. Nella parte alta della carota sono state individuate almeno due zone (intorno a 1443.8 e a 1442.5m) caratterizzate da piani di taglio ad alto angolo.

Il log FMI misurato lungo l'intervallo corrispondente alla carota in esame mostra due anomalie (tra 1452-1450m e tra 1445-1443m). L'analisi visiva della carota, tuttavia, non mette in evidenza un cambiamento di facies in grado di spiegare questo tipo di anomalia.

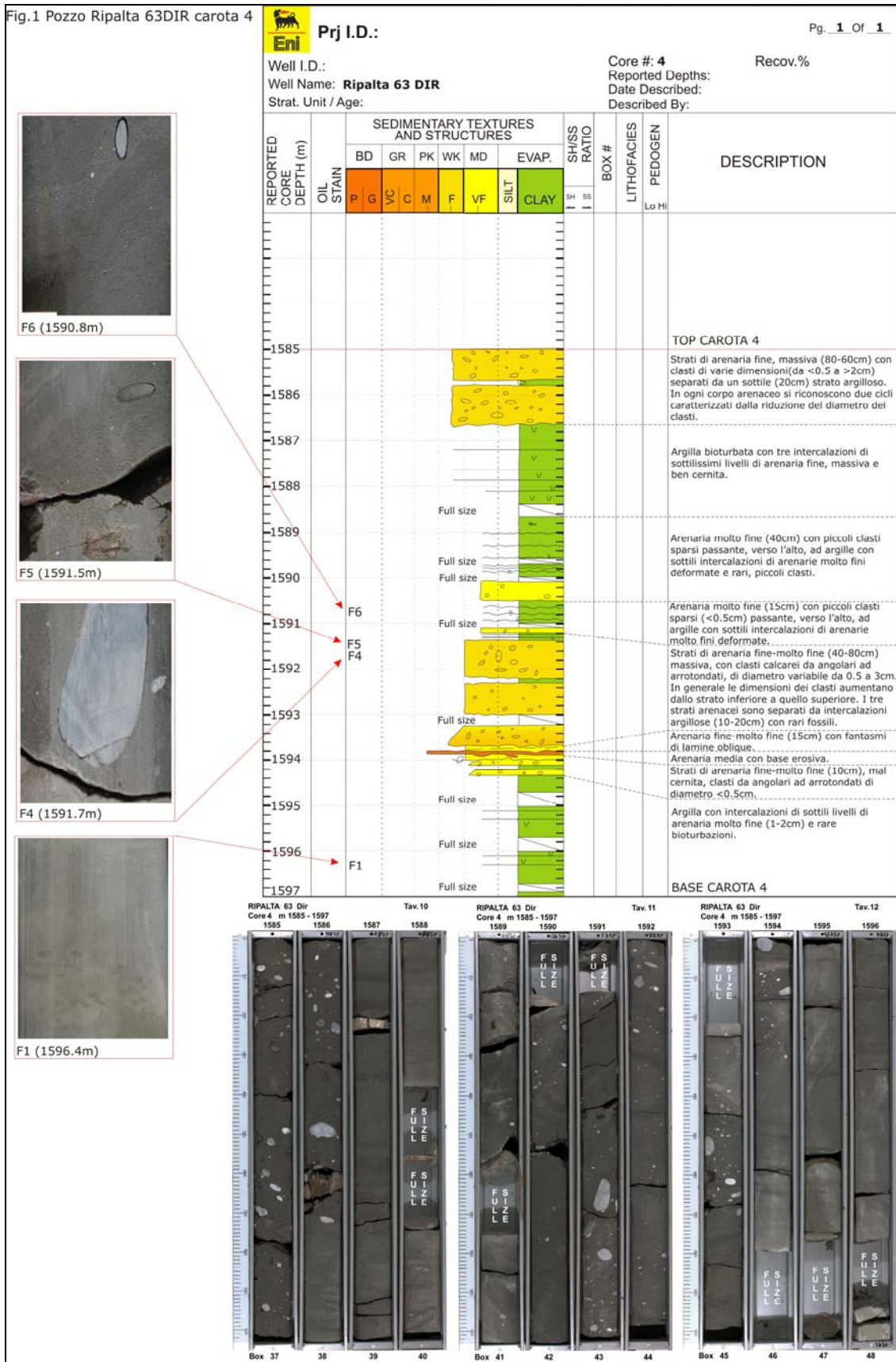


Fig. 4.1.1 – Ripalta 63 Dir: Carota 4.

Fig.2 Pozzo Ripalta 63DIR carota 3

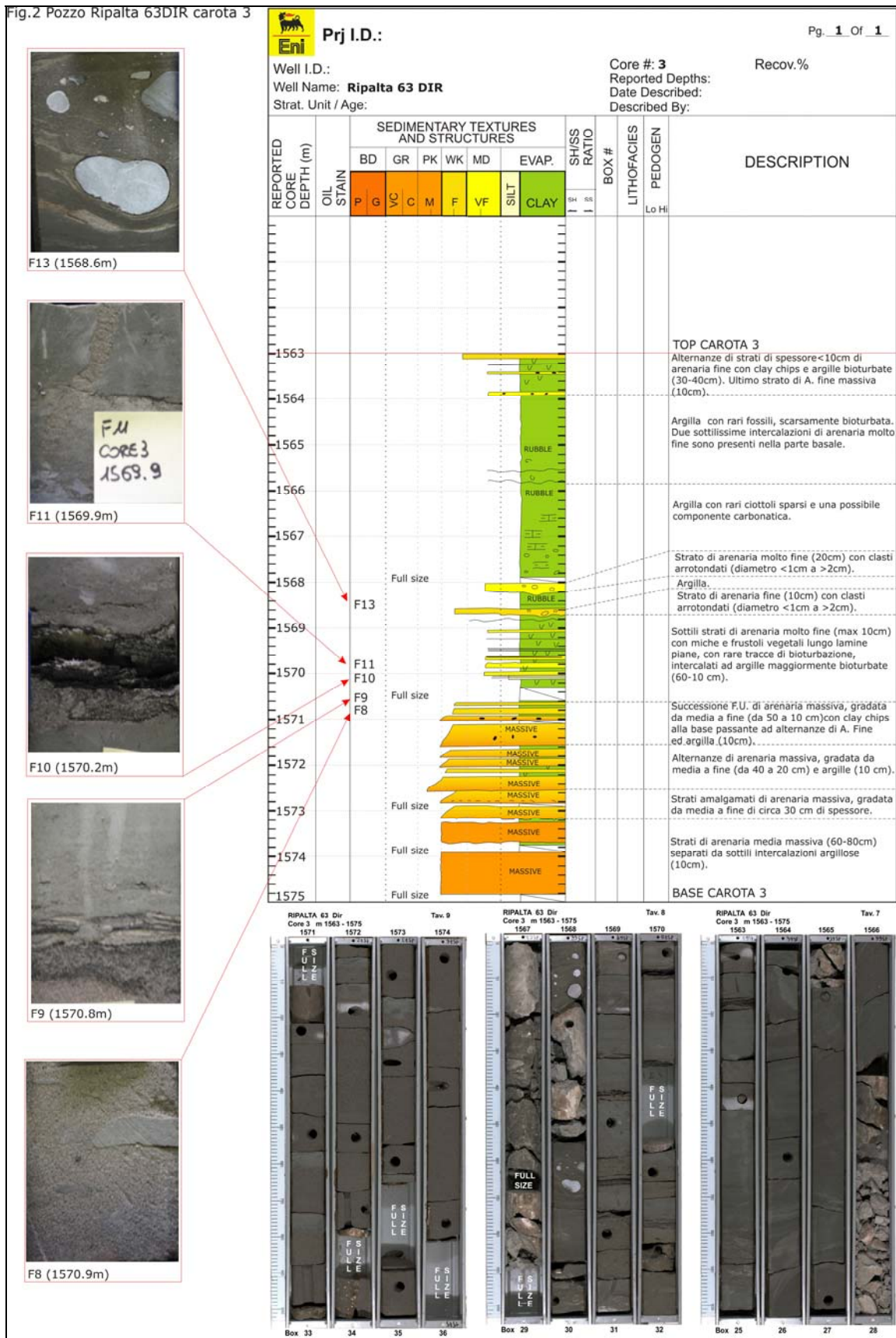


Fig. 4.1.2 – Ripalta 63 Dir: Carota 3.

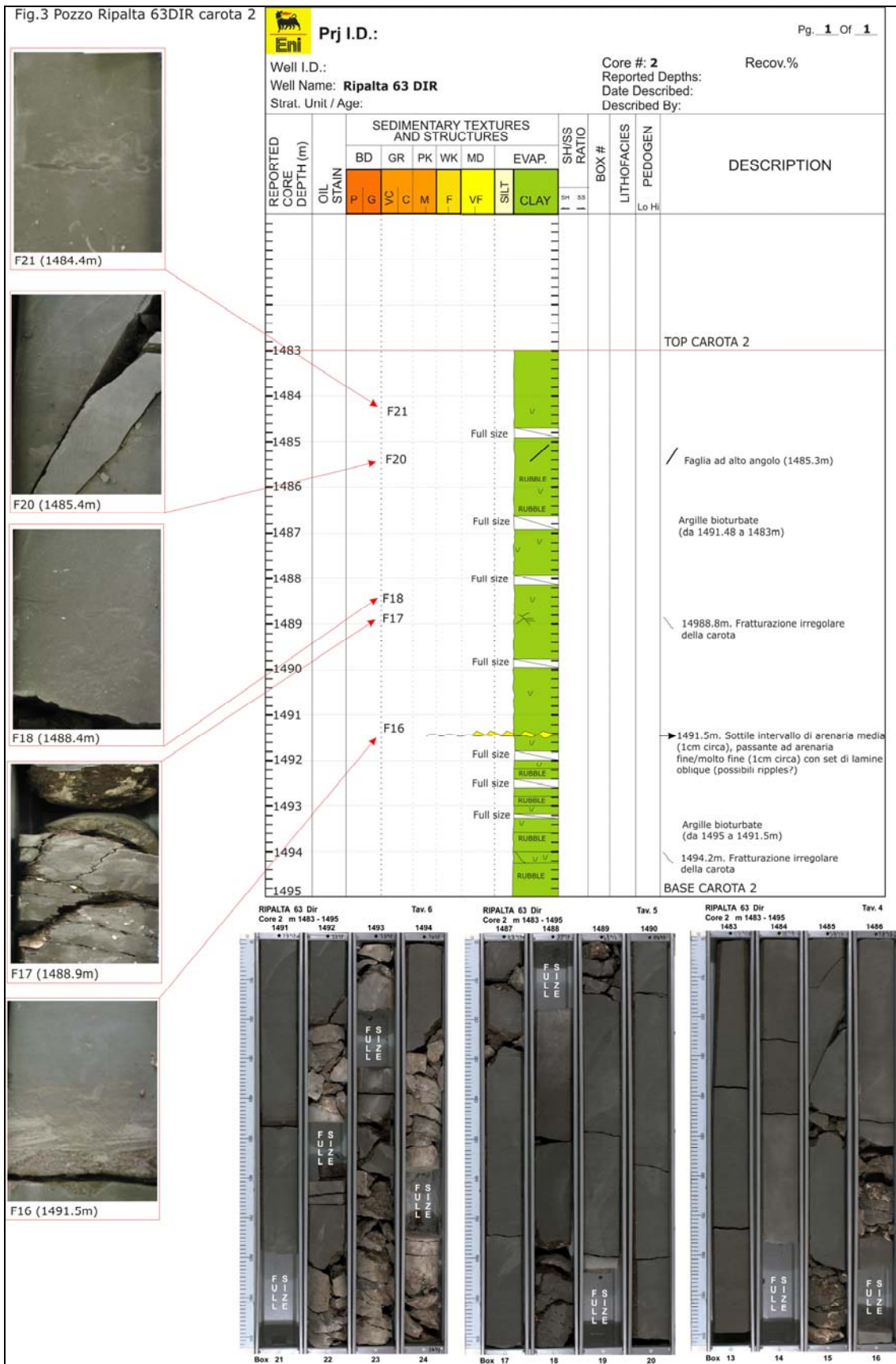


Fig. 4.1.3 – Ripalta 63 Dir: Carota 2.

Fig.4 Pozzo Ripalta 63DIR carota 1

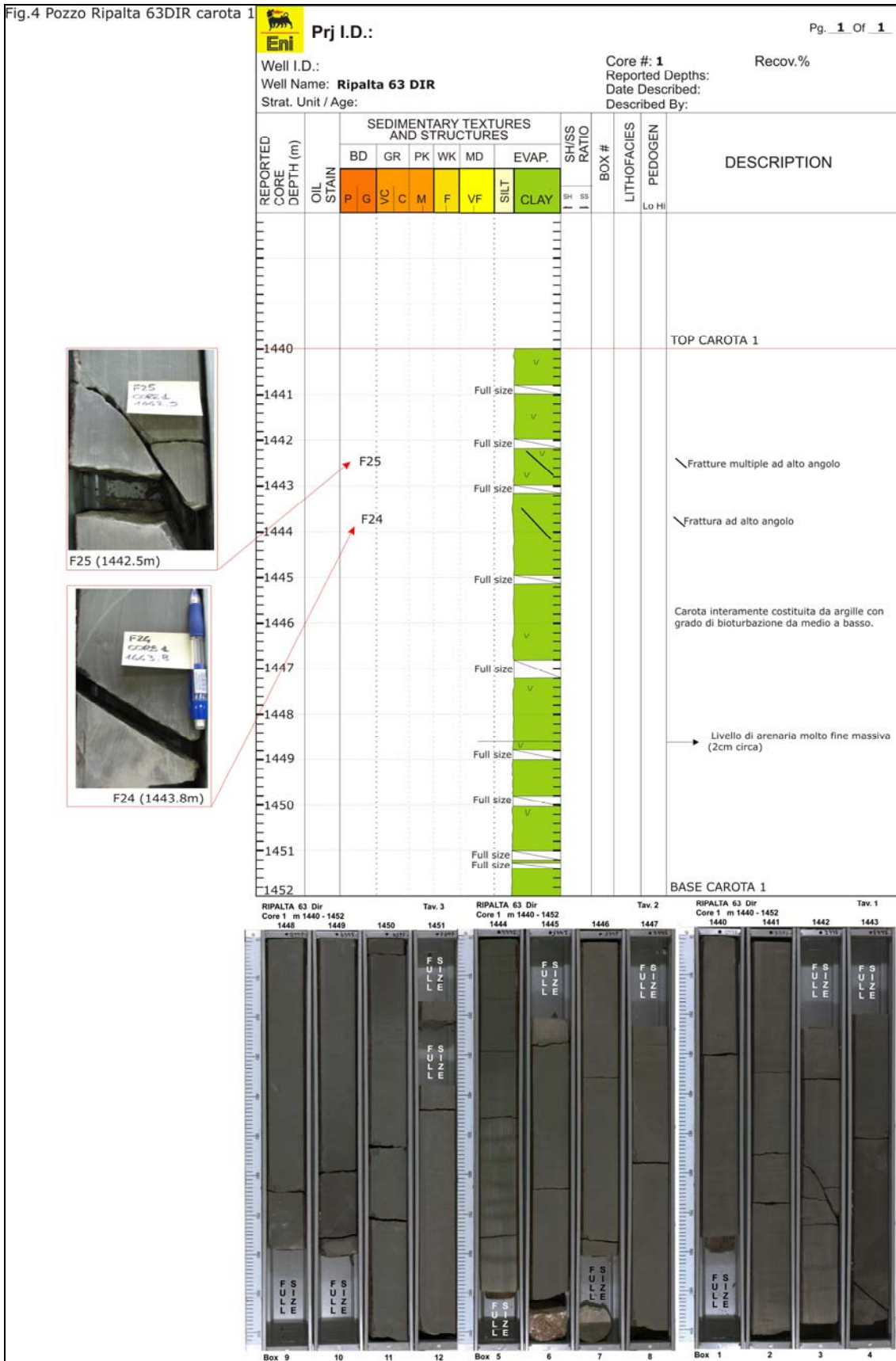


Fig. 4.1.4 – Ripalta 63 Dir: Carota 1.

4.2 Descrizione della fratturazione

L'osservazione diretta delle carote congiuntamente all'analisi dei log di immagine è servita in primo luogo a posizzarle reciprocamente in profondità ed ha inoltre permesso una più confidente interpretazione delle immagini stesse.

A tal fine sono stati usati alcuni livelli facilmente identificabili.

Nella seconda carota (1585-1597 m) un buon punto per verificare la messa in quota della stessa con i log di immagine è rappresentato dai piani di taglio a 1485.3 m profondità carota (asterisco blu in Fig. 4.2.1), corrispondenti alle sinusoidi ben visibili a 1485.5 su FMI. Sempre a questo scopo un aiuto per la messa in quota è fornito anche dai due intervalli conduttivi intorno a 1489 m su FMI (asterisco azzurro in Fig. 4.2.1) che possono trovare corrispondenza in carota con i due livelli contraddistinti dalla presenza di stiloliti.

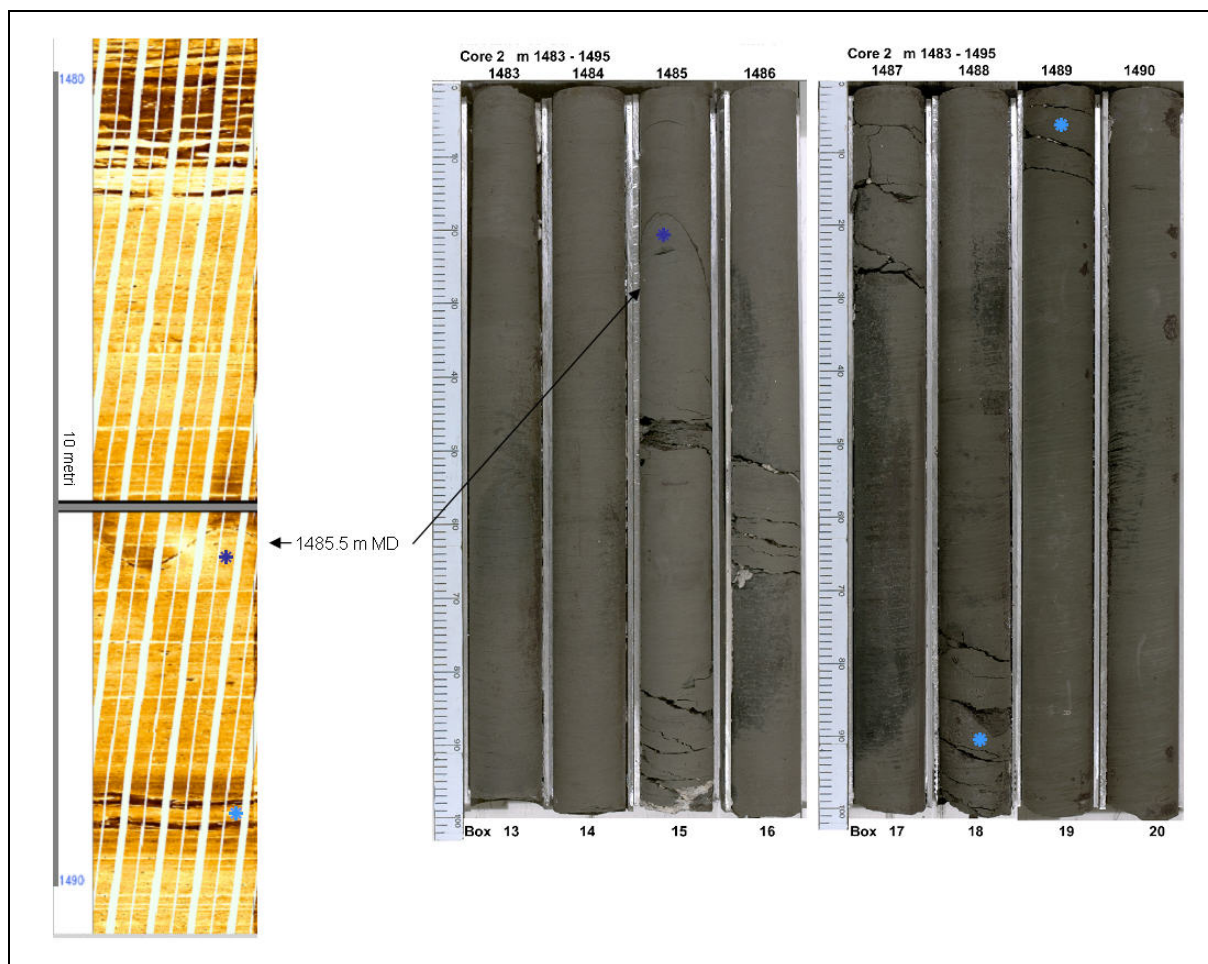


Fig. 4.2.1 – Confronto tra immagine da FMI e foto carota (carota 2). In questo caso non c'è differenza di quota tra i due dati: $Z_{log} = Z_{core}$.

Nella quarta carota (1585-1597 m) il miglior punto per verificare la messa in quota della stessa con i log di immagine è il passaggio WKST-SHALE, molto netto ed evidente a 1586.7 profondità carote e 1586.2 profondità FMI. Risulta dunque: $Z_{log} = Z_{carote} - 0.7$ m.

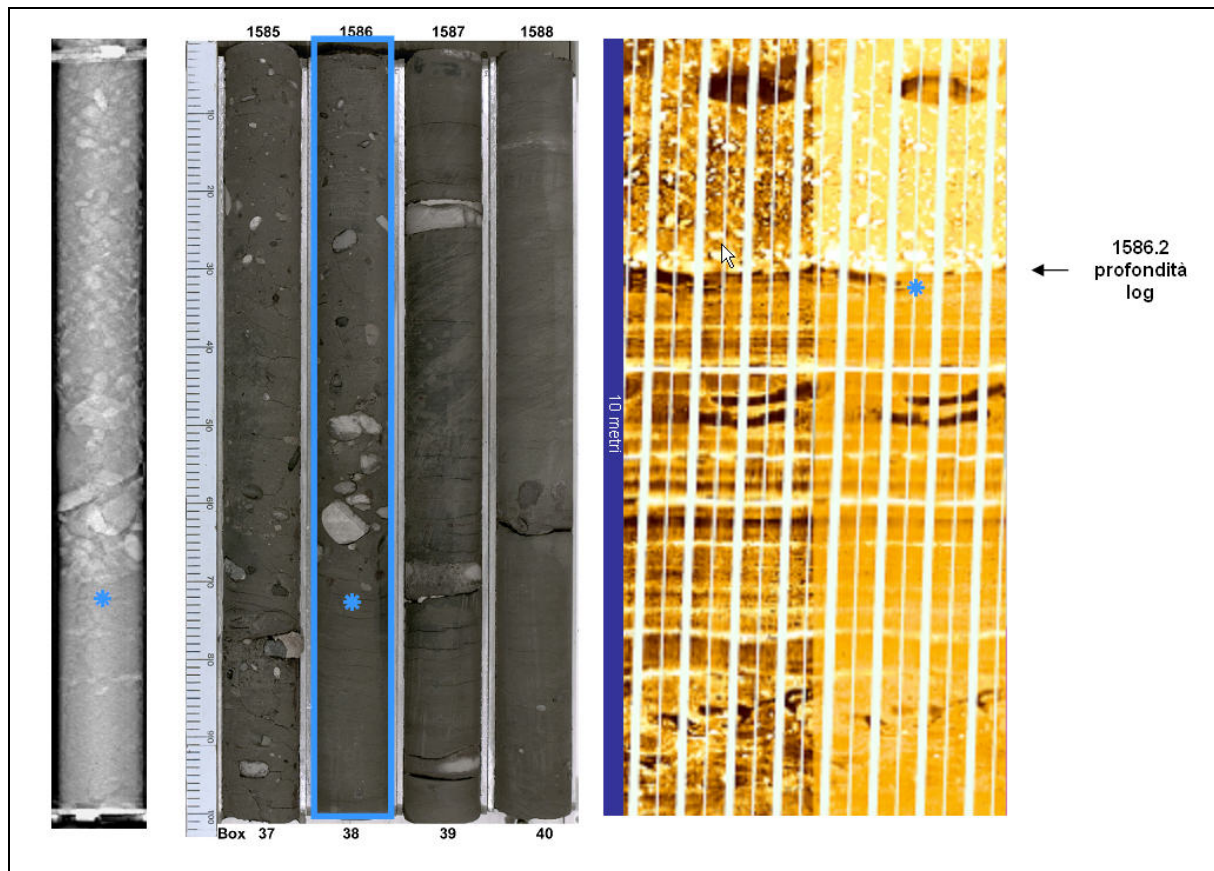


Fig. 4.2.2 – Confronto tra immagine da FMI e foto carota (carota 4). In questo caso non c'è differenza di quota tra i due dati: $Z_{log} = Z_{core} - 0.7 \text{ m}$.

Da confronto tra immagini FMI e dati carote risulta quanto segue:

- carota 1: profondità log = profondità carota - 0.3 m
- carota 2: profondità log = profondità carota
- carota 3: profondità log = profondità carota - 0.4 m
- carota 4: profondità log = profondità carota - 0.7 m

Le fratture naturali sono molto poche e tutte riconducibili a sforzi di taglio.

Nella carota 1 (1440-1452 m) le uniche fratture si osservano a 1442.65 e 1443.9 m profondità carota (rispettivamente asterisco arancione ed azzurro in Fig. 4.2.3). La prima corrisponde ad una zona di taglio diffuso di spessore millimetrico, con strike dip slip; il senso di movimento sembra essere inverso. La seconda appare come un singolo piano di taglio. L'inclinazione rispetto all'asse della carota è rispettivamente intorno ai 70° e 50°.

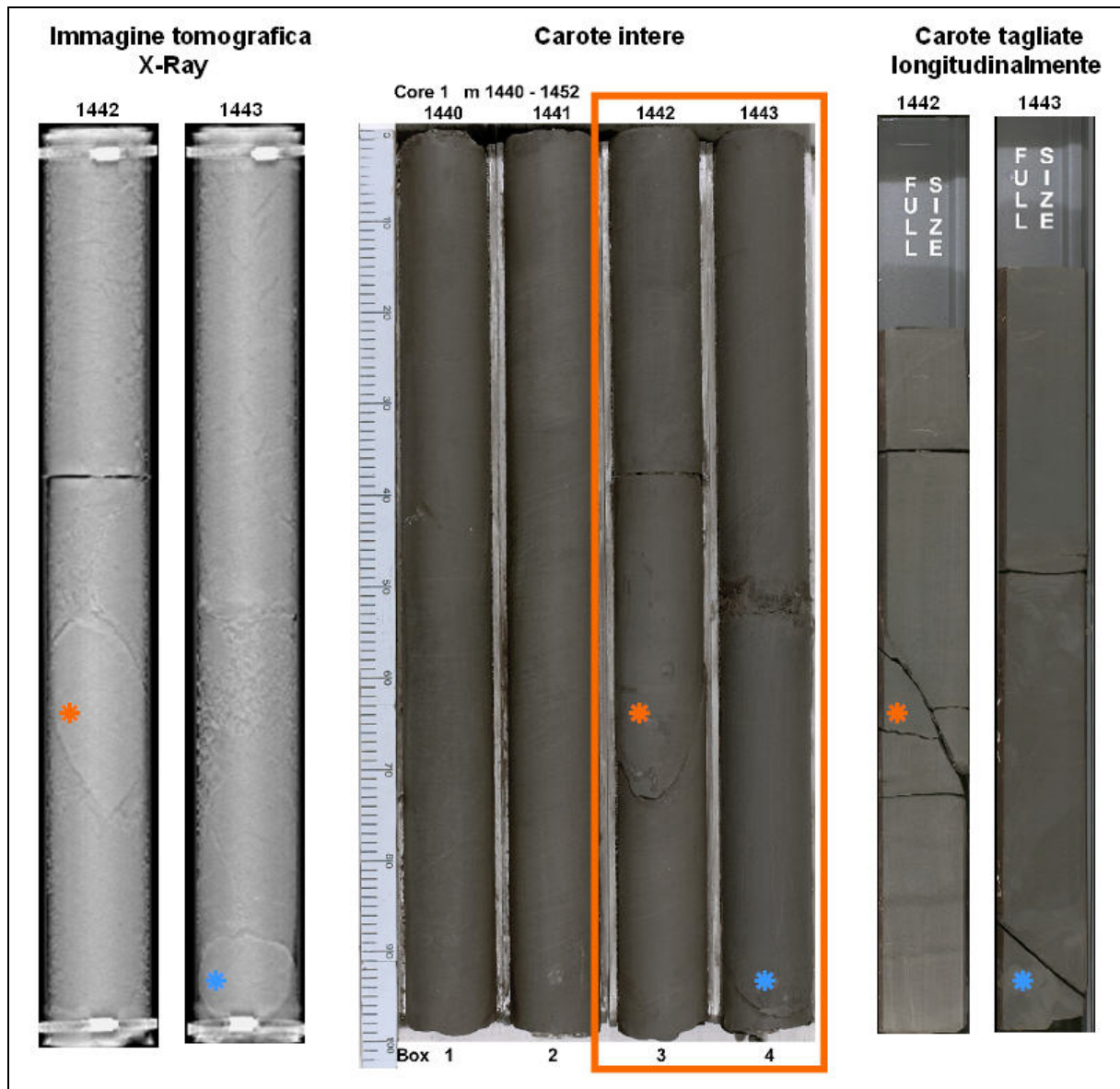


Fig. 4.2.3 – Carata 1 (1440-1452 m): le uniche fratture si osservano a 1442.65 (asterisco azzurro) e 1443.9 m (asterisco arancione). Questi piani sono già chiaramente identificabili nella immagine X-Ray, acquisita prima ancora di estrarre la carota dal *core barrel*.

Nella carota 2 (1483-1495 m) si osservano due netti piani di taglio a 1485.1 e 1485.3 m (asterischi arancioni in Fig. 4.2.4). Su entrambi i piani sono ben visibili strike dip slip; a 1485.3 m si apprezza anche una componente obliqua. Circa a metà della seconda carota, sulla superficie di taglio, sono chiaramente visibili tracce di stiloliti sia oblique (con picchi che formano un basso angolo rispetto alla verticale), sviluppatasi su piani a basso angolo rispetto all'orizzontale, sia francamente tettoniche (picchi orizzontali su piani subverticali). L'episodio è circoscritto a pochi decimetri di carota ma è senza dubbio indicatore di spinte orientate (almeno nella precedente storia di seppellimento).

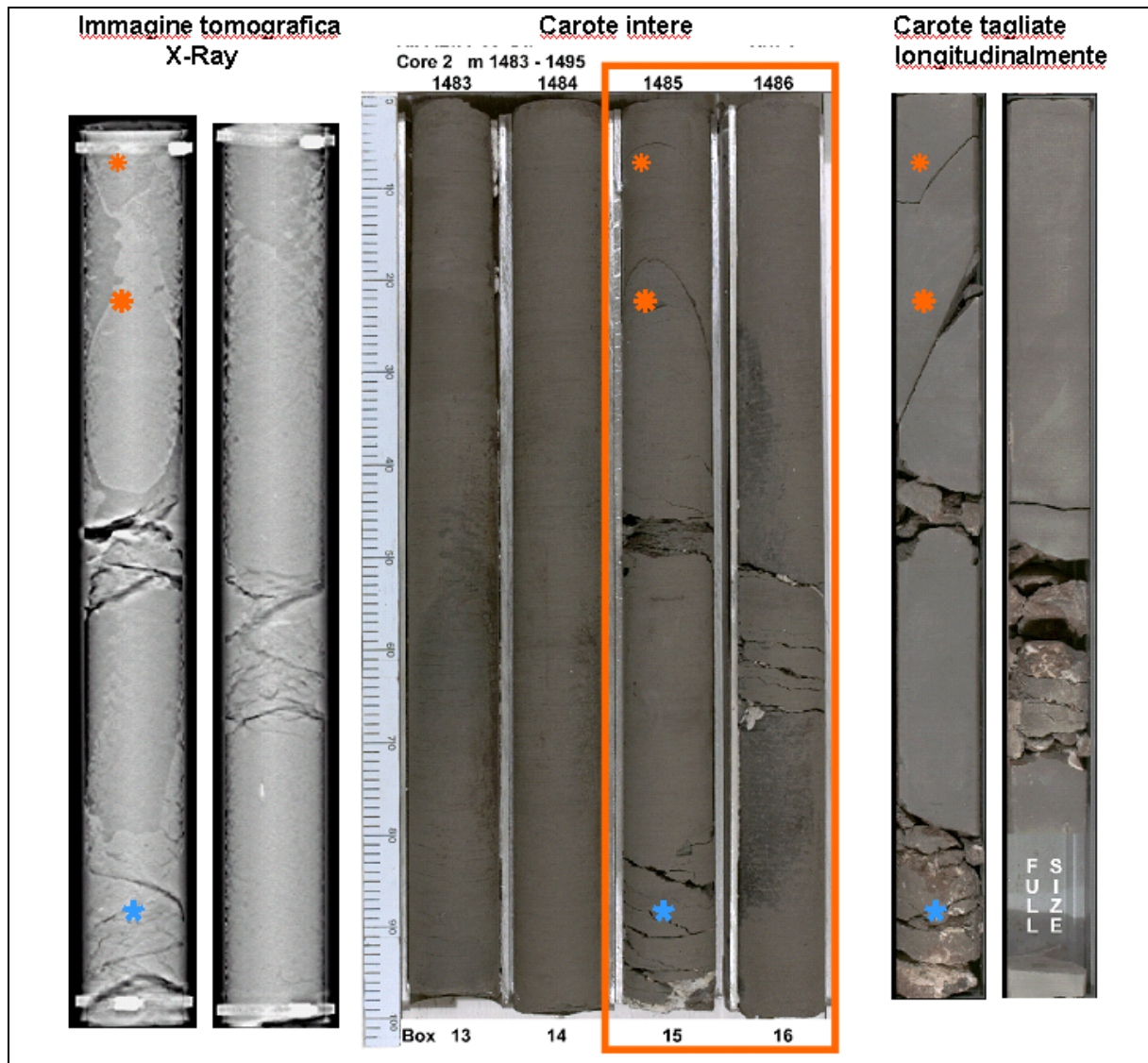


Fig. 4.2.4 – Carota 2 (1483-1495 m): si osservano due netti piani di taglio a 1485.1 e 1485.3 m (asterischi arancioni). Questi piani sono già chiaramente identificabili nella immagine X-Ray, acquisita prima ancora di estrarre la carota dal core barrel.

Sempre sulla carota 2, a partire da 1488.8 m, in corrispondenza di rotture probabilmente dovute od accentuate dal carotaggio, solo sulla superficie di taglio si osservano tracce di superfici sottoposte a presso-soluzione.

I picchi stilolitici formano un angolo con la verticale: lo sforzo che le ha prodotte doveva dunque avere anche una componente orizzontale non nulla. Intorno a 1488.5 m l'immagine tomografica della carota cambia: da una immagine abbastanza uniforme si passa ad una più eterogenea, per la presenza di tracce scure (= meno dense) che, a cavallo di 1489 m, mostrano una buona corrispondenza con le stiloliti (Fig. 4.2.5).

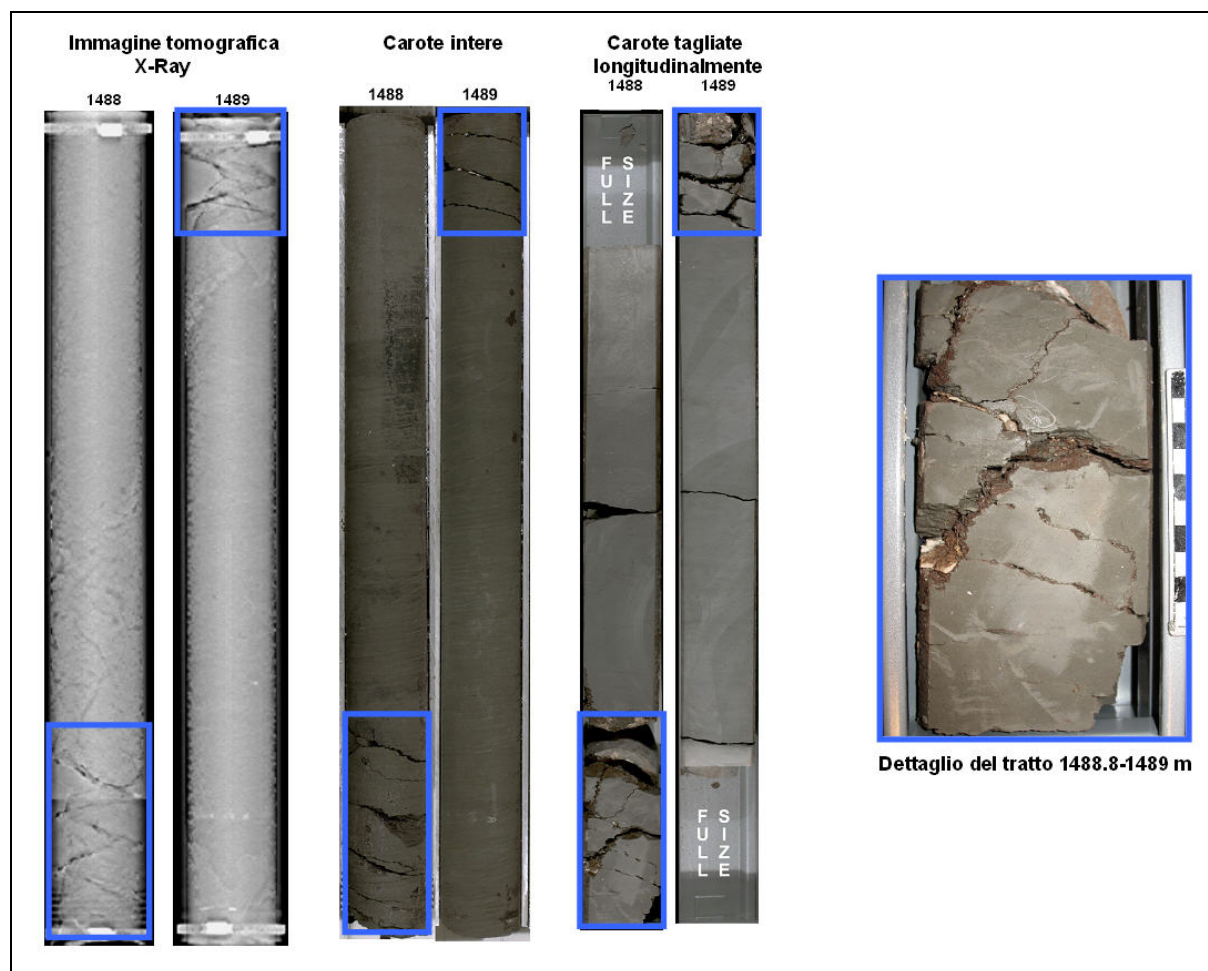


Fig. 4.2.5 – Carota 2 (1483-1495 m): a partire da 1488.8 m sono presenti numerose superfici stilolitiche. A destra è possibile vedere ingrandito un tratto dove il fenomeno di presso-soluzione è particolarmente evidente.

Nella carota 3 (1563-1575 m) non sono state riconosciute fratture naturali.

Nella carota 4 (1585-1597 m) si è potuto osservare invece un solo piano di taglio a 1589.1 m (asterisco azzurro in Fig. 4.2.6). Tale superficie è difficilmente riconoscibile sull'immagine tomografica.

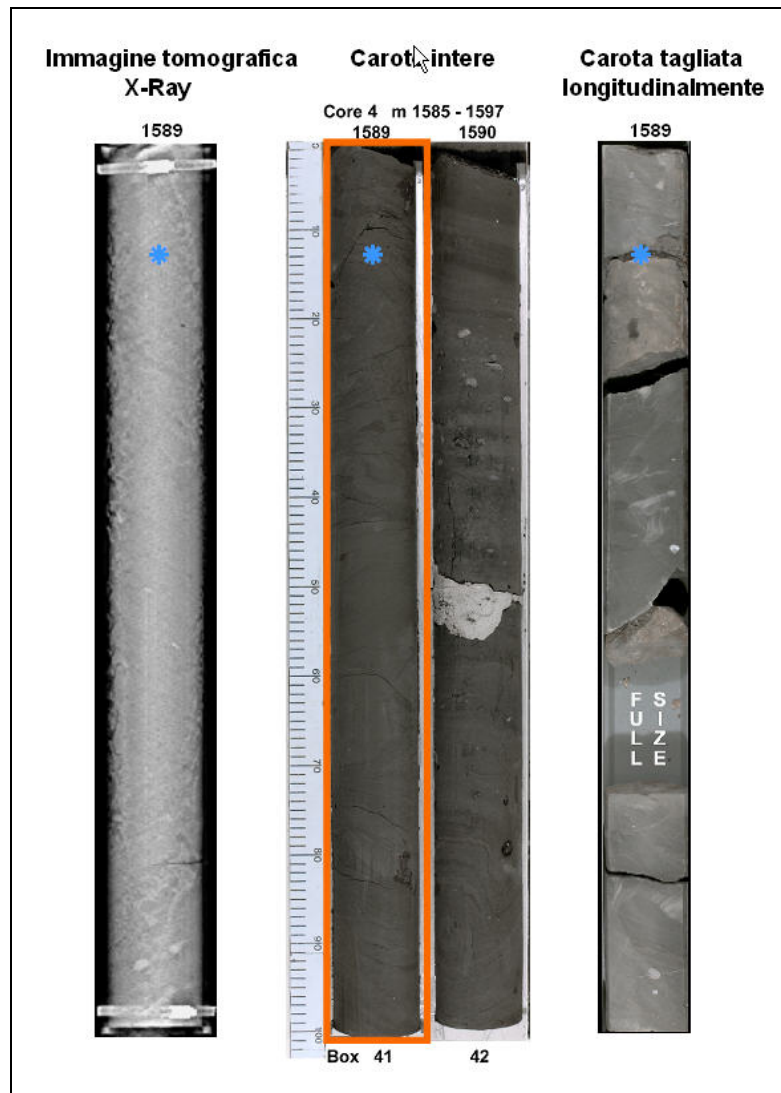


Fig. 4.2.6 – Carota 4 (1585-1597 m): si può notare un solo piano di taglio a 1589.1 m (asterisco azzurro), riconoscibile con difficoltà nella immagine X-Ray.

4.3 Threshold pressure

Sono state condotte ventitre prove su tre differenti carote. In Tabella 4.3.1 sono presentati i dati essenziali riguardo ai provini ed i risultati della prova. Tutti i provini sono stati sottoposti ad una pressione di confinamento efficace pari a 125 bar.

Provino	Profondità [m]	Threshold Pressure [bar]	
3	1440.8 - 1440.9	> 70	carota 1
9	1442.1 - 1442.2	60 - 65	
5	1443.1 - 1443.2	danneggiato	
74	1445.1 - 1445.2	50 - 55	
6	1447.2 - 1447.3	danneggiato	
8	1448.9 - 1449	50 - 55	
75	1449.9 - 1450	50 - 55	
7	1451.2 - 1451.3	65 - 70	
18	1484.8 - 1484.9	65 - 70	carota 2
14	1488.1 - 1488.2	danneggiato	
16	1489.8 - 1489.9	60 - 65	
13	1491.8 - 1491.9	> 70	
77	1492.4 - 1492.5	danneggiato	
15	1493.1 - 1493.2	45 - 50	
17	1493.1 - 1493.2	50 - 55	
78	1494.5 - 1494.6	50 - 55	carota 4
76	1588.5 - 1588.6	danneggiato	
24	1589.53 - 1589.63	65 - 70	
22	1590 - 1590.1	danneggiato	
25	1591 - 1591.1	65 - 70	
20	1593.1 - 1593.2	> 70	
23	1594.8 - 1594.9	65 - 70	
21	1596.8 - 1596.9	danneggiato	

Tabella 4.3.1: Tabella riassuntiva delle prove di threshold pressure

I valori di threshold pressure, nelle prime due serie di prove eseguite (carote 1 e 2), mostrano soglie di sfondamento che variano tra 45 ad oltre 70 bar. Nella terza serie di prove (carota 4), la soglia di sfondamento è maggiore o uguale a 65 bar.

4.4 Geomeccanica

4.4.1 Introduzione

La caratterizzazione geomeccanica delle argille di copertura di Ripalta 63 dir è stata condotta con prove triassiali del tipo isotropicamente consolidate e non drenate (TxICU) e con prove edometriche in cella triassiale.

Nel seguito riportiamo dapprima la descrizione della prova triassiale isotropicamente consolidata e non drenata per poi passare alla presentazione dei risultati dell'elaborazione dei dati sperimentali che è stata eseguita usando il modello CAM-CLAY. A sua volta questa parte è divisa in una prima parte, dove sono riportati i parametri meccanici ed i grafici dai quali sono stati ricavati, ed in una parte finale, con una spiegazione teorica dei dati ottenuti e del modo seguito per l'interpretazione.

Infine presenteremo i risultati ottenuti con le prove edometriche in cella triassiale.

4.4.2 Descrizione prova

In Tabella 4.4.1 riportiamo le informazioni principali sui provini usati nelle prove. Sono state eseguite tre serie di prove, ciascuna composta da quattro prove, usando una procedura che consiste nel consolidare la prova fino alla pressione di confinamento prevista, per poi condurre la fase triassiale in regime non drenato. In Fig. 4.4.1 riportiamo l'andamento degli sforzi totali applicati al provino 1B in funzione del tempo, al quale si aggiunge anche la pressione dei pori che viene sviluppata nel provino durante la fase triassiale. Tali andamenti sono tipici di una prova triassiale isotropicamente consolidata e non drenata in fase di compressione triassiale.

Provino	Confinamento [MPa]	Profondità [m]	Diametro [mm]	Lunghezza [mm]
1A	0.5	1445.30	37.74	75.05
1B	10.0	1451.00	37.64	83.96
1C	15.0	1445.10	37.76	72.28
1D	25.0	1445.20	37.64	83.96
2A	0.5	1487.00	37.89	76.44
2B	10.0	1492.40	37.90	65.37
2C	15.0	1487.00	37.87	80.93
2D	25.0	1487.00	37.59	71.26
4A	0.5	1588.65	37.97	71.86
4B	10.0	1595.90	38.07	82.45
4C	15.0	1588.65	37.96	76.13
4D	25.0	1588.65	37.93	78.26

Tabella 4.4.1: Elenco provini usati per le prove triassiali.

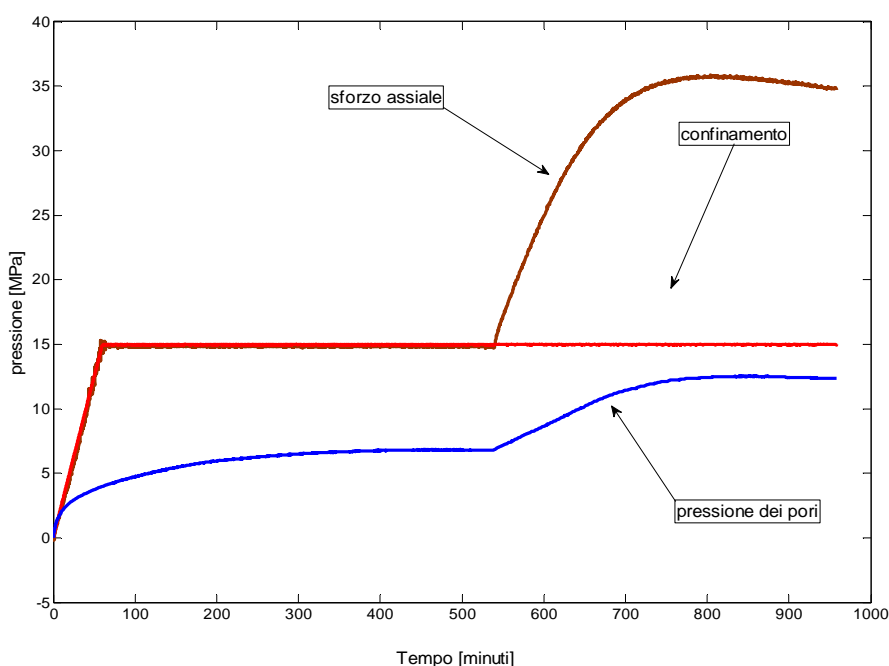


Fig. 4.4.1: Andamento dello sforzo assiale e di confinamento e della pressione dei pori durante la fase di compressione isotropa e triassiale per il provino 1B.

In fase triassiale la prova viene condotta in controllo di velocità di carico assiale, così come è mostrato dalla linea retta della deformazione assiale in Fig. 4.4.2.

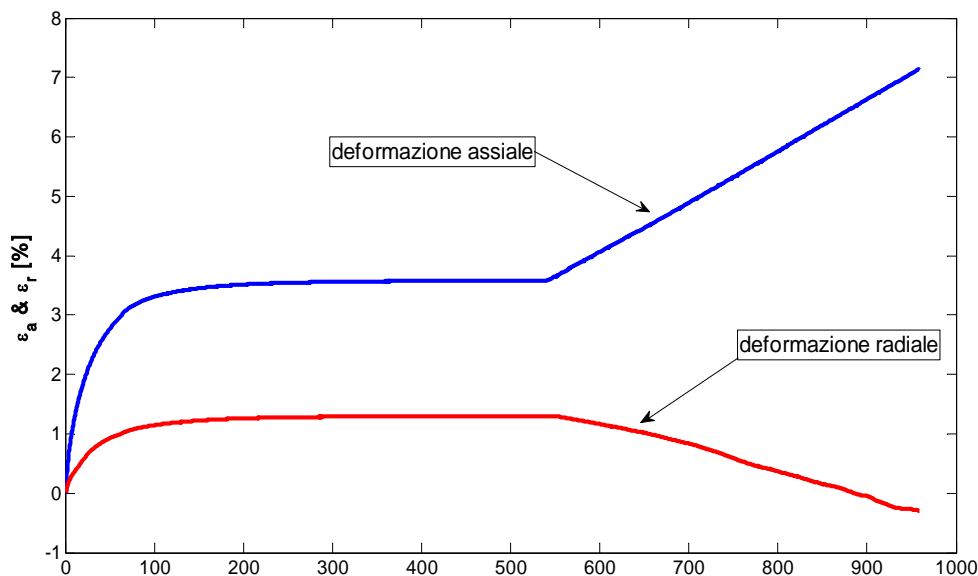


Fig. 4.4.2: Andamento delle deformazioni assiali e radiali durante le fasi di confinamento isotropo e di carico triassiale per la prova 1B.

Lo scopo di tale tipo di prova è di potere stabilire le caratteristiche di resistenza di rocce e terreni a bassissima permeabilità, com'è nel caso dell'argilla di copertura in esame, nel minor tempo possibile. Pertanto si consolida il terreno fino a portarlo alla pressione isotropa che corrisponde alla pressione di confinamento della parte triassiale, lasciando che dreni e cambi di volume. In un secondo tempo, durante la parte triassiale, il terreno è in condizioni non drenate e la misura della pressione dei pori permette di risalire allo sforzo efficace che agisce all'interno del provino.

4.4.3 Risultati

In questo paragrafo vengono riportati i risultati dell'interpretazione delle prove. In Tabella 4.4.2 sono riportati i parametri elastici di deformabilità ed i parametri di resistenza ottenuti dalle prove.

Provino	Confinamento [MPa]	Profondità [m]	Diametro [mm]	Lunghezza [mm]	Res. Picco [MPa]	Mod. Elastico [MPa]	Mod. Taglio [MPa]	Coefficiente Poisson	Coesione [MPa]	Angolo di attrito [°]
1A	0.5	1445.30	37.74	75.05	4.68	242.42	78.02	0.42	0.3	26.7°
1B	10.0	1451.00	37.64	83.96	18.02	1231.47	461.90	0.34		
1C	15.0	1445.10	37.76	72.28	20.90	1680.80	596.30	0.30		
1D	25.0	1445.20	37.64	83.96	35.33	3225.24	1232.76	0.29		
2A	0.5	1487.00	37.89	76.44	4.87	230.09	71.71	0.59	0	28.4°
2B	10.0	1492.40	37.90	65.37	15.49	850.66	313.59	0.40		
2C	15.0	1487.00	37.87	80.93	15.34	1094.26	363.02	0.57		
2D	25.0	1487.00	37.59	71.26	33.53	2508.90	780.76	0.53		
4A	0.5	1588.65	37.97	71.86	7.33	346.08	133.66	0.37	1.5	0
4B	10.0	1595.90	38.07	82.45	11.53	706.07	272.17	0.31		
4C	15.0	1588.65	37.96	76.13	13.81	790.48	305.41	0.34		
4D	25.0	1588.65	37.93	78.26	30.63	1665.34	612.11	0.35		

Tabella 4.4.2: Parametri elastici di deformabilità (modulo elastico e di taglio e coefficiente di Poisson) e di resistenza (coesione ed angolo di attrito) ricavati dall'interpretazione delle prove triassiali.

Data la tipologia di prova, i valori dei coefficienti di Poisson riportati in Tabella 4.4.2 dovrebbero essere pari a 0.5, mentre si registrano valori di ν pari a 0.29. I valori di ν inferiori a 0.5 significano che la saturazione del provino non era completa.

Si può tracciare il grafico dei valori di ν , E e G in funzione delle pressioni di confinamento totali usate durante le prove triassiali e delle profondità. In Fig. 4.4.3 e Fig. 4.4.4 sono riportati tali grafici per il coefficiente di Poisson. Si nota in Fig. 4.4.3 la dipendenza dei valori di ν dalla pressione di confinamento, dipendenza che sembra non esserci, invece, rispetto alle profondità. Riguardo al modulo elastico e a quello di taglio, è chiaramente visibile una dipendenza sia rispetto al confinamento, Fig. 4.4.5 e Fig. 4.4.7, che rispetto alla profondità, Fig. 4.4.6 e Fig. 4.4.8. In particolare i due moduli hanno un andamento decrescente con la profondità.

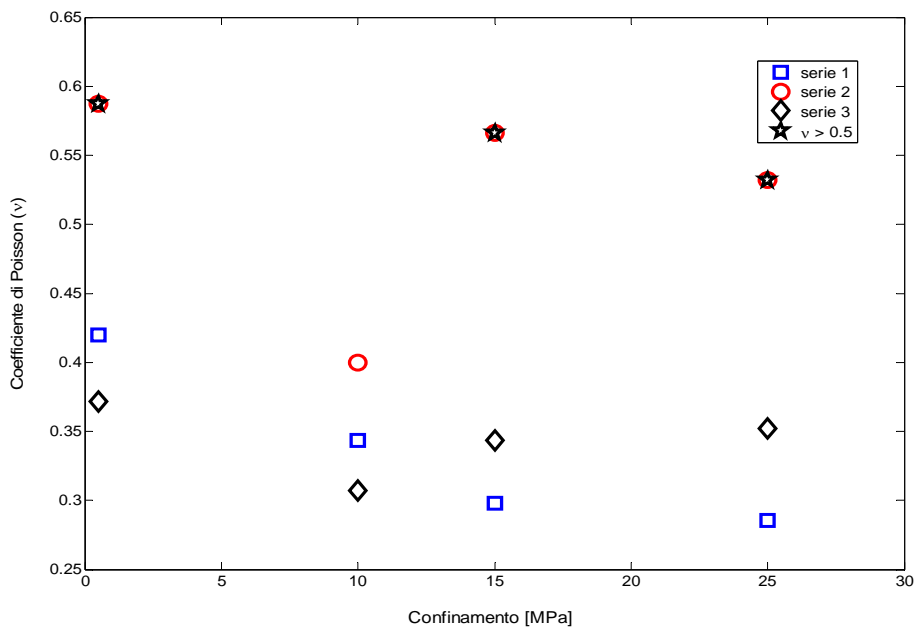


Fig. 4.4.3: Andamento dei valori del coefficiente di Poisson al variare della pressione di confinamento.

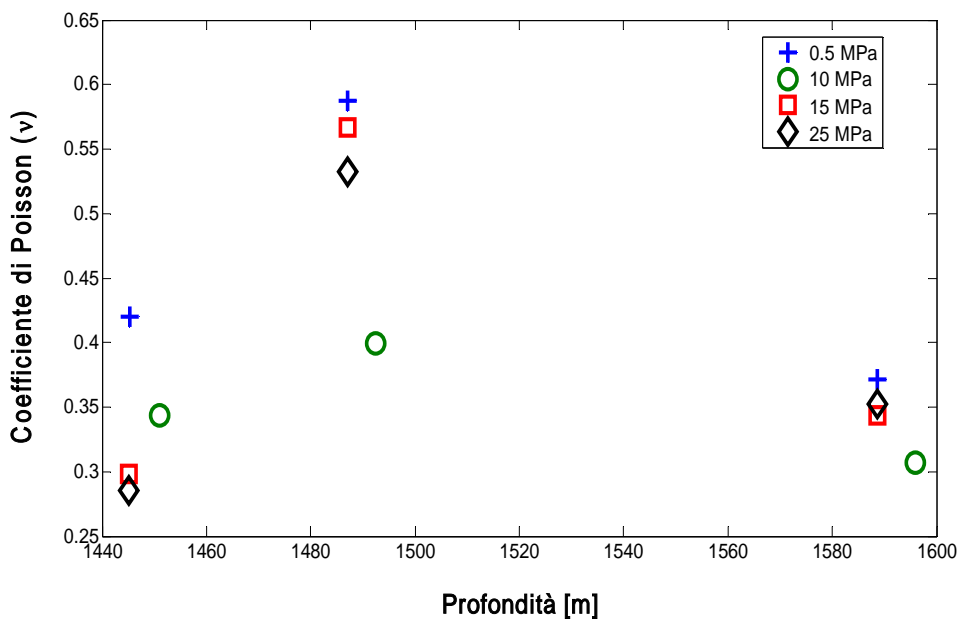


Fig. 4.4.4: Andamento dei valori del coefficiente di Poisson al variare della profondità e ad ugual confinamento .

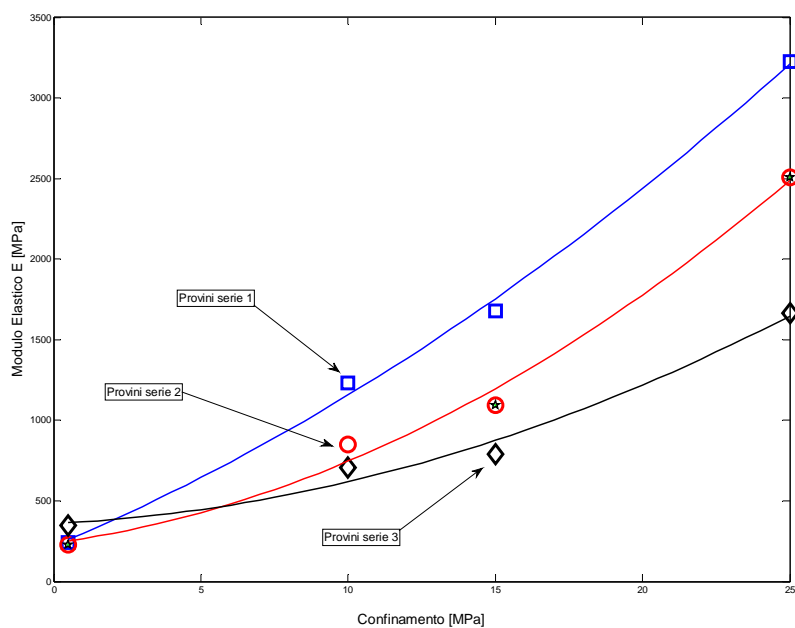


Fig. 4.4.5: Andamento dei moduli elastici in funzione del confinamento.

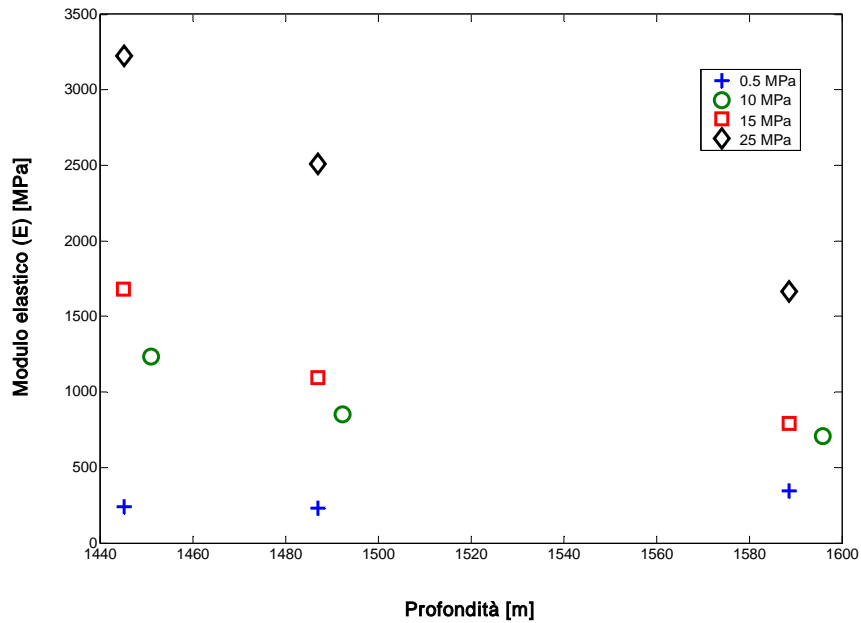


Fig. 4.4.6: Andamento dei moduli elastici ad equal confinamento in funzione della profondità.

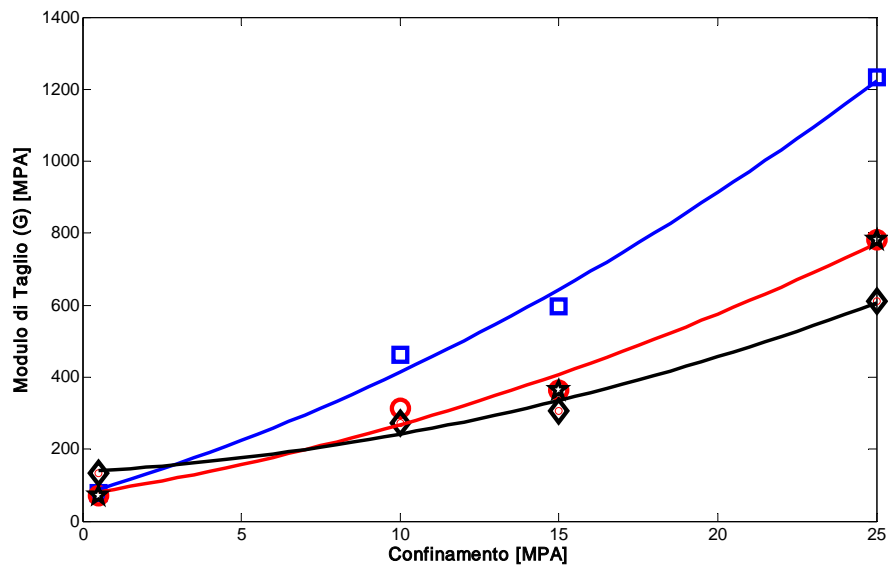


Fig. 4.4.7: Andamento dei moduli di taglio in funzione del confinamento.

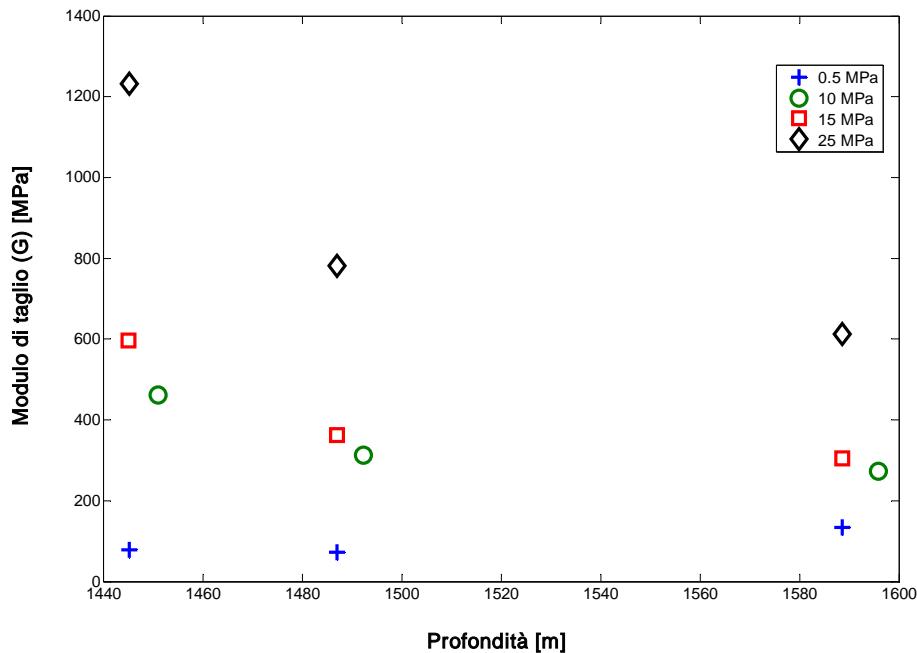


Fig. 4.4.8: Andamento dei moduli di taglio ad equal confinamento in funzione della profondità.

I valori di coesione ed angolo di attrito vengono stimati a partire dall'esame dei percorsi di sollecitazione efficaci che, per le presenti prove, sono riportati nel grafico A delle Fig. 4.4.9, Fig. 4.4.11 e Fig. 4.4.13. Nelle medesime figure, poi, sono riportati gli andamenti delle deformazioni di volume ed un ingrandimento dei medesimi per la fase triassiale (grafico B e D) ed infine l'andamento della pressione dei pori al variare della p' (grafico C).

Il significato delle notazioni usate è mostrato dalle relazioni seguenti, con le quali si definiscono i valori dello sforzo medio efficace, p' , dello sforzo di taglio q e della deformazione di volume ε_v . In tali relazioni σ_{ax} e σ_c sono rispettivamente lo sforzo assiale e quello di confinamento; u è la pressione dei pori; ε_{ax} e ε_r sono la deformazione assiale e quella radiale.

$$p' = p - u' = \frac{\sigma_{ax} + 2 * \sigma_c}{3} - u$$

$$q = \sigma_{ax} - \sigma_c$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{ax} + 2 * \varepsilon_r$$

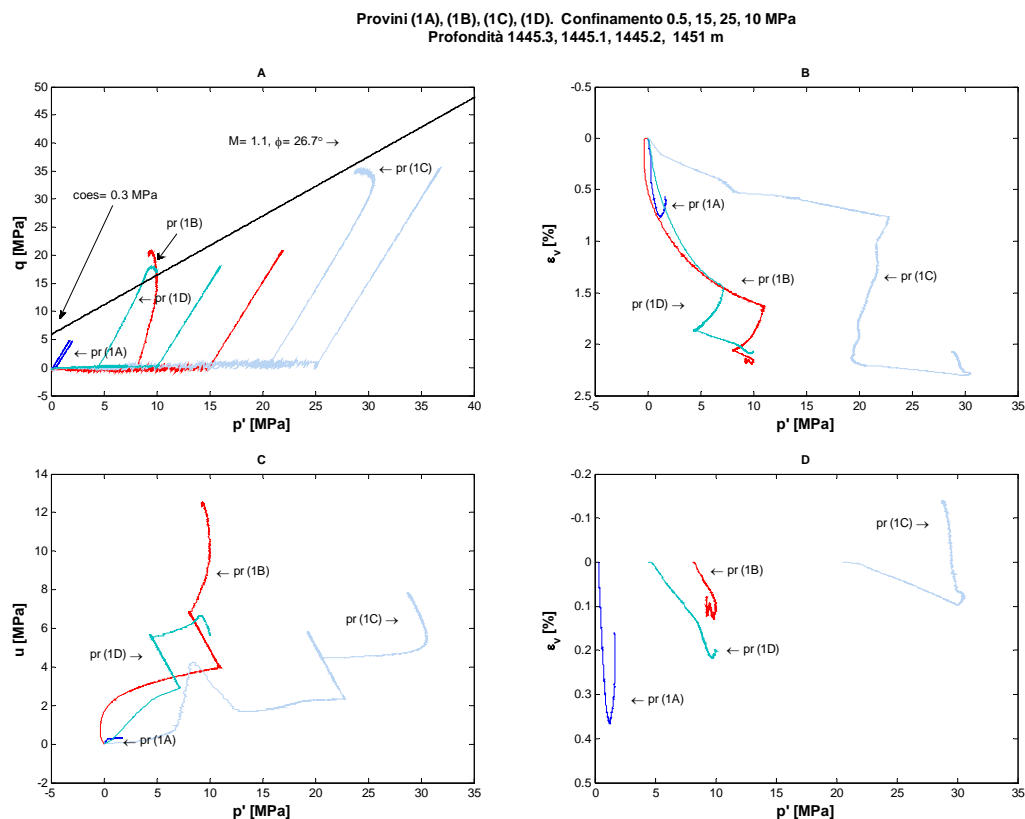


Fig. 4.4.9: Provini 1A, 1B, 1C, 1D: A) Inviluppo di rottura nel piano (p',q) ; B) e D) andamento della deformazione di volume con la pressione efficace; C) andamento della pressione di pori in funzione della pressione efficace

Nella seconda figura relativa a ciascun gruppo di prove (Fig. 4.4.10, Fig. 4.4.12 e Fig. 4.4.14) viene riportato il grafico classico delle curve sforzo-deformazioni (grafico A) insieme ai grafici dell'andamento dello sforzo e deformazioni di taglio (grafico B) e dello sforzo di taglio normalizzato con la pressione media efficace sempre con le deformazioni di taglio (grafico D). Infine, nel grafico C, è riportato l'andamento della deformazione di volume in funzione della deformazione di taglio ϵ_s che è definita come:

$$\epsilon_s = \frac{2}{3}(\epsilon_{ax} - \epsilon_r)$$

Provini (1A), (1B), (1C), (1D). Confinamento: 0.5, 15, 25, 10 MPa.
Profondità 1445.3, 1445.1, 1445.2, 1451 m

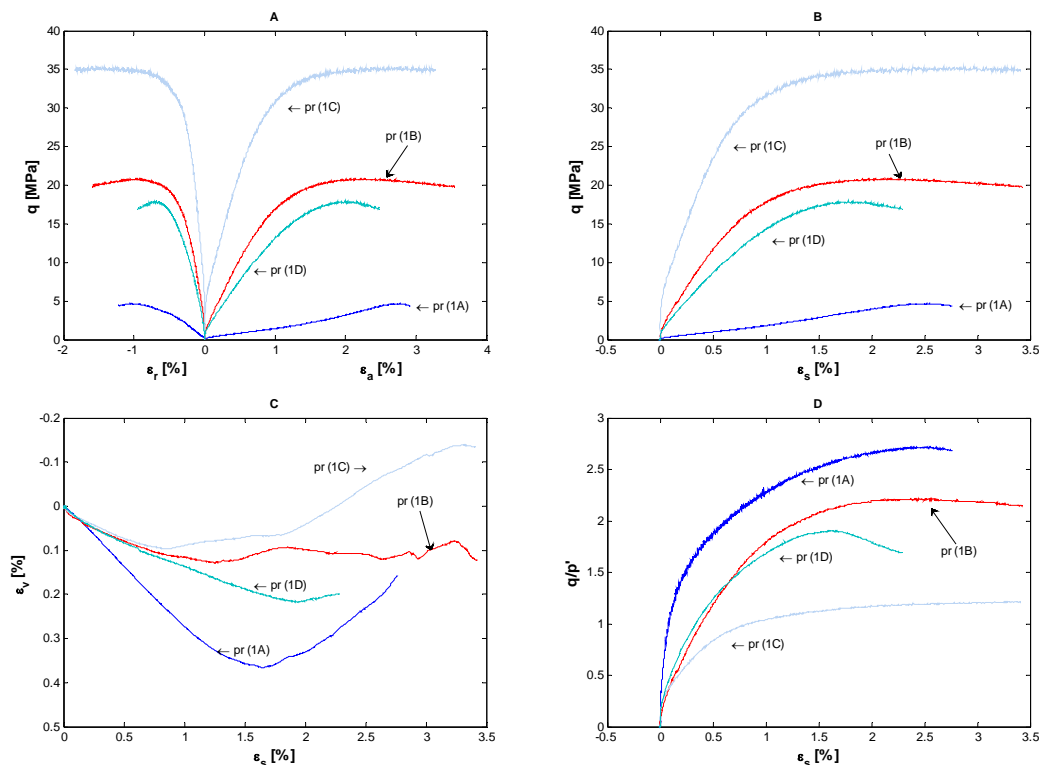


Fig. 4.4.10: Provini 1A, 1B, 1C, 1D: A) Curva sforzo-deformazioni; B) Sforzo e deformazioni di taglio; C) Deformazione di volume in funzione della deformazione di taglio; D) Sforzo normalizzato con la pressione media in funzione delle deformazioni di taglio.

Per una migliore comprensione dei risultati sperimentali, si riportano, nella Fig. 4.4.15, le curve teoriche nei piani (p', q) , (p', ϵ_v) e (q, ϵ_a) secondo quanto previsto dal modello Cam-Clay per prove TxICU a differenti pressioni di consolidamento, su di un'argilla satura. Secondo il modello, infatti, durante la fase di compressione isotropa non drenata, il percorso delle sollecitazioni sul piano (p', q) passa da una curva come quella che collega i punti A_1 e B_1 , per provini ad elevato grado di sovra-consolidazione, a curve come quella tra i punti A_3 e B_3 , per provini normal-consolidati, Fig. 4.4.15. Corrispondentemente sul piano (p', ϵ_v) , essendo la fase triassiale non drenata e quindi a deformazione di volume nulla, i punti rappresentativi dello stato dei campioni si muovono lungo un segmento orizzontale ad $\epsilon_v = \text{costante}$.

Provini (2A), (2B), (2C), (2D). Confinamento: 0.5, 15, 25, 10 MPa
Profondità 1487, 1487, 1487, 1492.4 m

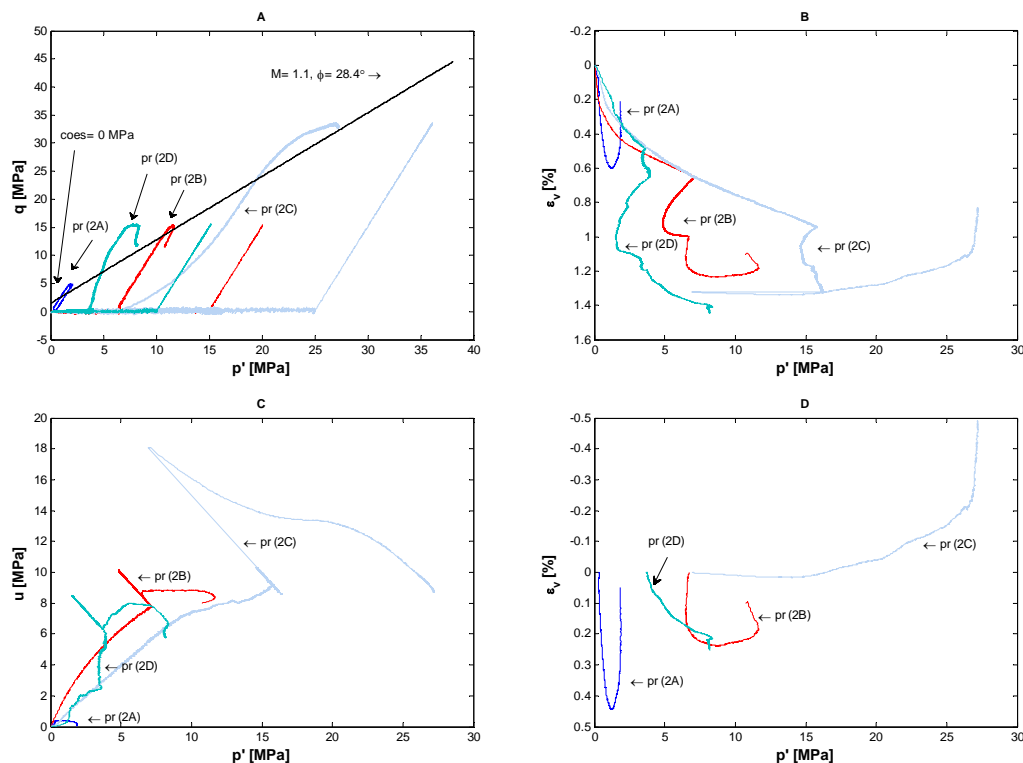


Fig. 4.4.11: Provini 2A, 2B, 2C, 2D: A) Inviluppo di rottura nel piano (p',q) ; B) e D) andamento della deformazione di volume con la pressione efficace; C) andamento della pressione di pori in funzione della pressione efficace.

Come era da prevedersi, dati i valori di v in Tabella 4.4.2, mentre il modello prevede che la prova non drenata abbia una deformazione di volume nulla, nella realtà sono state misurate delle deformazioni di volume di valore più o meno limitato. Come accennato in precedenza ciò può essere dovuto alla non completa saturazione dei provini stessi.

Interessanti evidenze sperimentali mostrano, comunque, differenze di comportamento tra le differenti serie di prove. Dall'esame del grafico C della Fig. 4.4.14, le prove della serie 4 sembrano mostrare un comportamento maggiormente normal consolidato rispetto alle altre serie. Le prove della serie 2, invece, mostrano un comportamento che è da ritenersi di tipo sovraconsolidato, come mostrano le curve dell'andamento della pressione dei pori nel grafico C della Fig. 4.4.11.

Provini (2A), (2B), (2C), (2D). Confinamento 0.5, 15, 25, 10 MPa
Profondità 1487, 1487, 1487, 1492.4 m

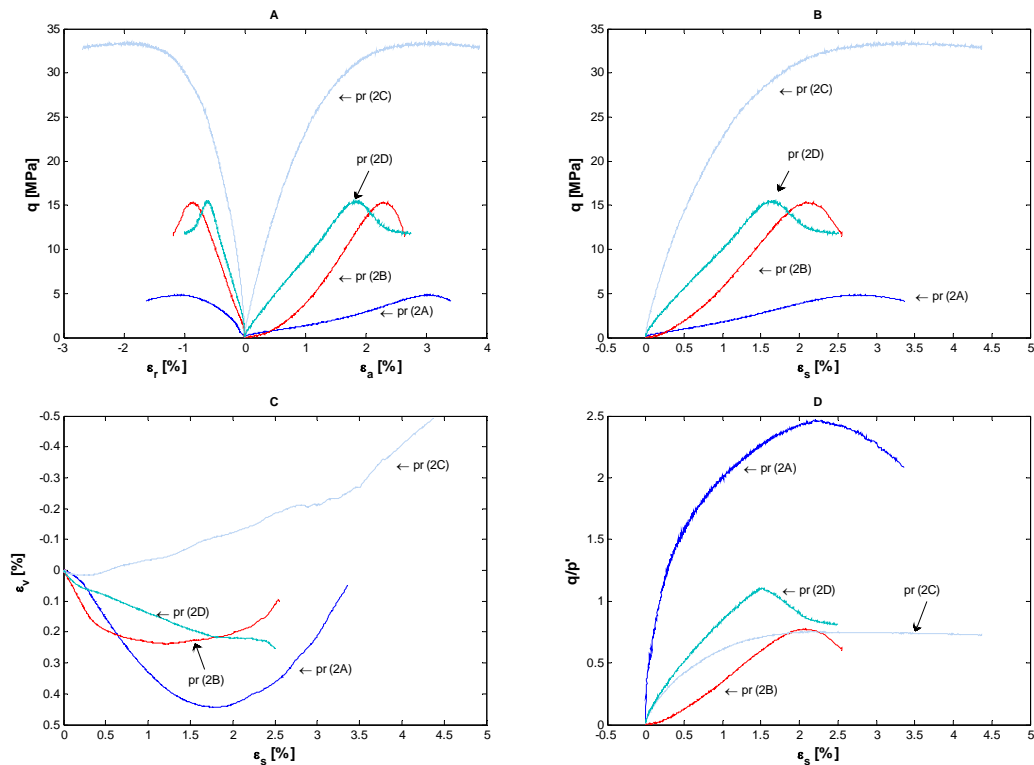


Fig. 4.4.12: Provini 2A, 2B, 2C, 2D: A) Curva sforzo-deformazioni; B) Sforzo e deformazioni di taglio; C) Deformazione di volume in funzione della deformazione di taglio; D) Sforzo normalizzato con la pressione media in funzione delle deformazioni di taglio.

Per la serie 4 determinare l'involuppo di rottura ha comportato una qualche difficoltà, in quanto l'ultima prova triassiale mostra un elevato valore di sforzo alla rottura. Si è deciso di riportare in Tabella 4.4.2 le due coppie di valori di coesione ed angolo di attrito che si possono ottenere tenendo in conto oppure no la prova a confinamento più elevato.

Provini (4A), (4B), (4C), (4D). Confinamento 0.5, 15, 25, 10 MPa.
Profondità 1588.65, 1588.65, 1588.65, 1595.9 m

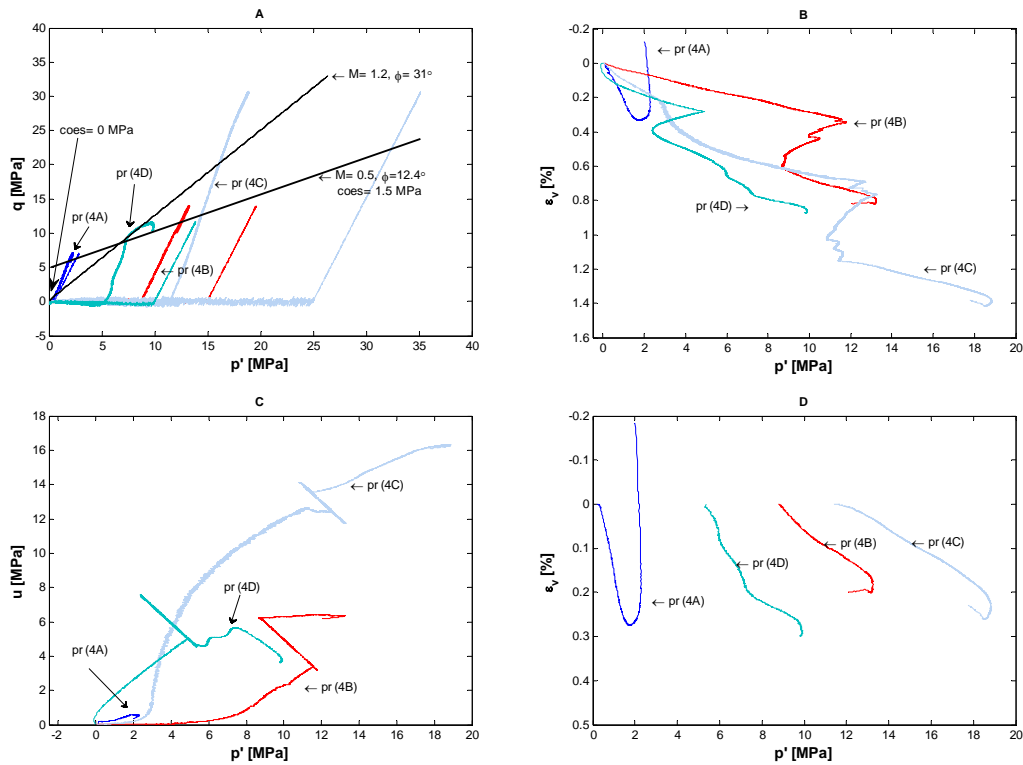


Fig. 4.4.13: Provini 4A, 4B, 4C, 4D: A) Inviluppo di rottura nel piano (p',q); B) e D) andamento della deformazione di volume con la pressione efficace; C) andamento della pressione di pori in funzione della pressione efficace.

Provini (4A), (4B), (4C), (4D). Confinamento: 0.5, 15, 25, 10 MPa.
Profondità 1588.65, 1588.65, 1588.65, 1595.9 m

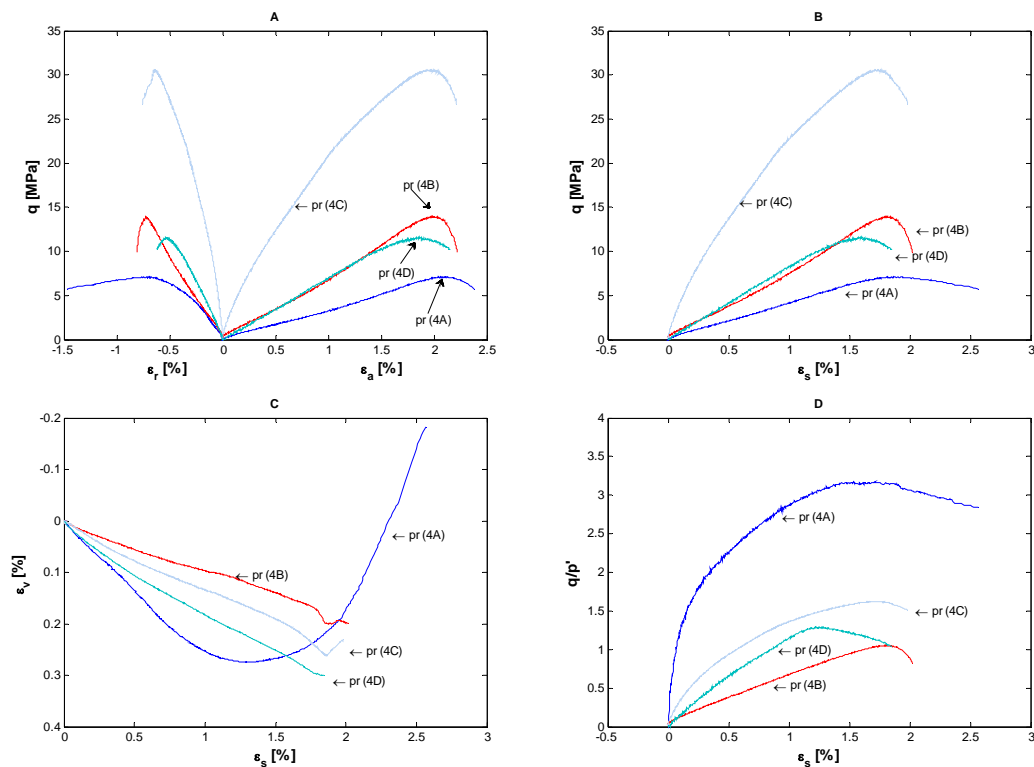


Fig. 4.4.14: Provini 4A, 4B, 4C, 4D: A) Curva sforzo-deformazioni; B) Sforzo e deformazioni di taglio; C) Deformazione di volume in funzione della deformazione di taglio; D) Sforzo normalizzato con la pressione media in funzione delle deformazioni di taglio.

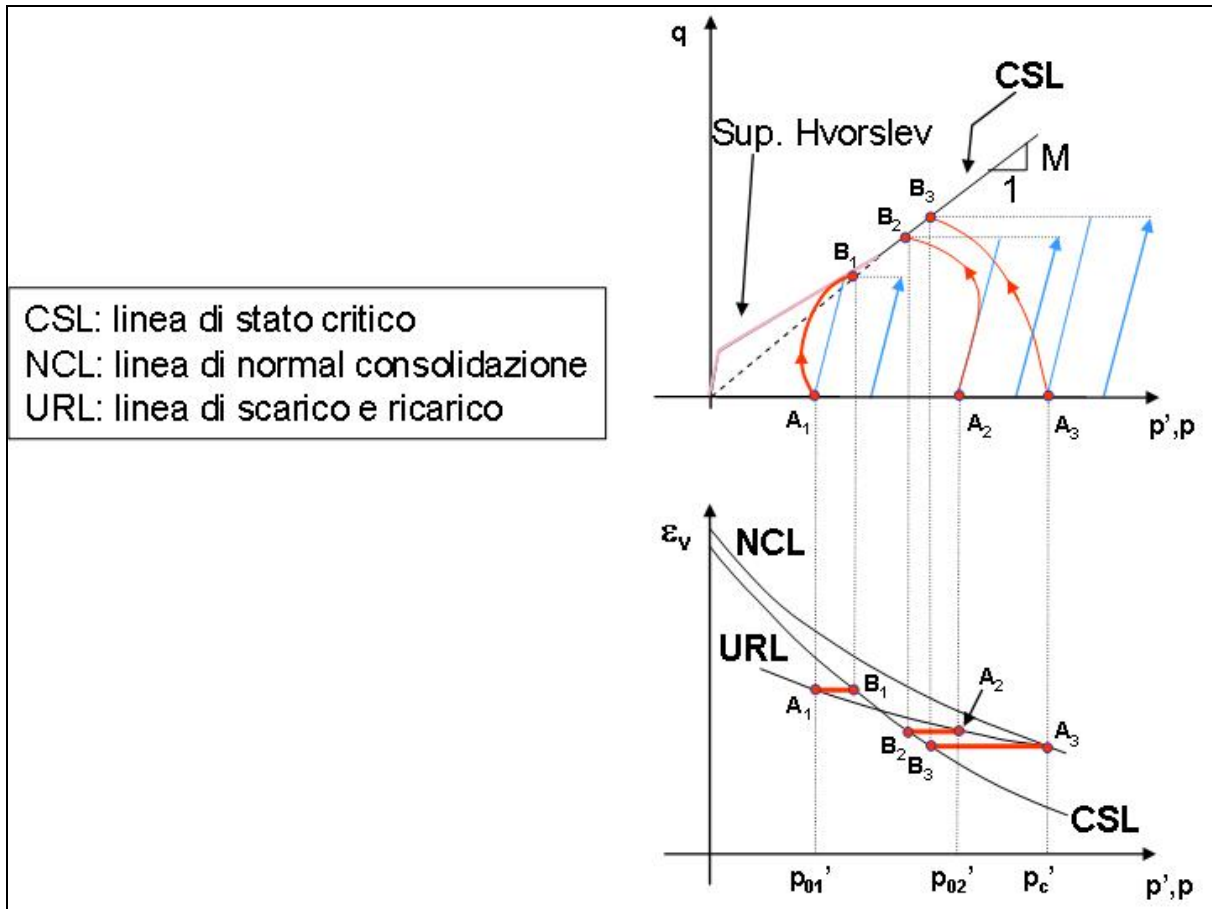


Fig. 4.4.15: Risultati di prove isotropicamente consolidate e non drenate previste dal modello CAM-CLAY per provini della medesima argilla con differenti valori di sovraconsolidazione isotropa.

4.4.4 Prove edometriche in cella triassiale

Le seguenti prove sono state condotte in cella triassiale, imponendo al provino delle condizioni di tipo edometrico, ovvero si è imposto che durante la prova la sua deformazione radiale fosse nulla. Questa condizione si ottiene variando opportunamente il valore della pressione di confinamento. Il vantaggio della prova edometrica condotta in cella triassiale consiste appunto nella possibilità di misurare lo sforzo di confinamento. Ciò permette di ottenere informazioni più precise sullo stato di sforzo in sito.

I provini testati sono stati otto ed in Tabella 2.4.3 vengono riportate le rispettive profondità e l'andamento del valore medio di C_m per il tratto vergine della curva edometrica. Tale andamento è riportato graficamente in funzione della profondità in Fig. 4.4.16. Da essa si osserva come C_m sia leggermente decrescente con la profondità anche se l'ordine dei valori è costante.

provino	01	07	03	05	02	08	04	06
profondità [m]	1440.8-1440.9	1445.1-1445.2	1448.9-1449	1483.1	1491.8-1491.9	1494.5	1593.1-1593.2	1596.8-1596.9
C_m vergine medio [MPa ⁻¹]	5.860E-04	4.950E-04	5.540E-04	4.770E-04	4.060E-04	2.490E-04	2.100E-04	2.170E-04

Tabella 2.4.3: Provini testati in cella triassiale ed in condizioni edometriche con i rispettivi valori medi di C_m per il tratto di curva vergine.

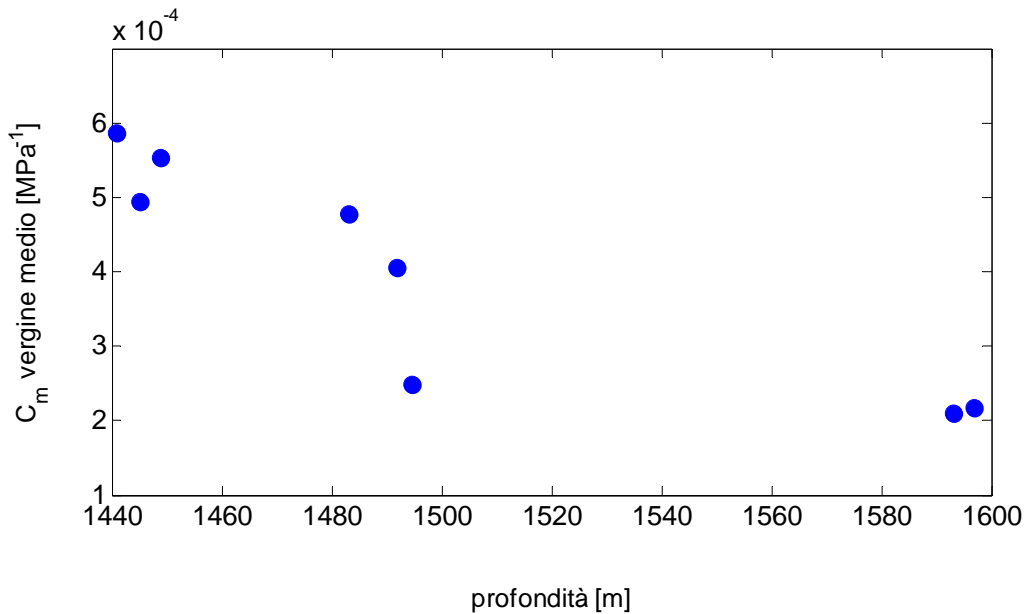


Fig. 4.4.16: Andamento del valore medio di C_m misurato sul tratto vergine della curva edometrica al variare della profondità di campionamento.

Nel seguito riportiamo i grafici delle prove eseguite, più precisamente la curva ($\log(\sigma_v)$, cedimento) e il percorso delle sollecitazioni nel piano (p',q).

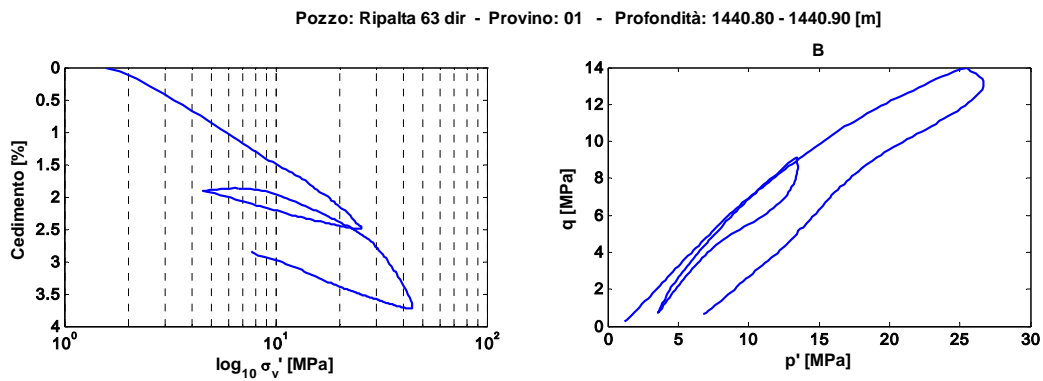


Fig. 4.4.17: Curva edometrica e percorso delle sollecitazioni per il provino 01.

Pozzo: Ripalta 63 dir - Provino: 07 - Profondità: 1445.10 - 1445.20 [m]

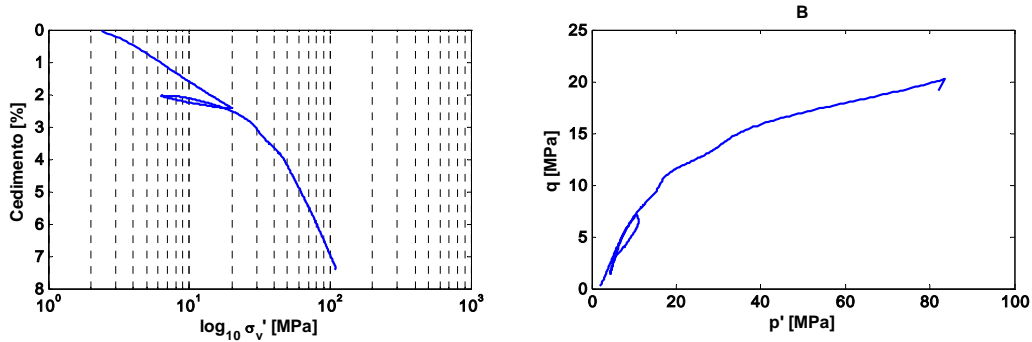


Fig. 4.4.18: Curva edometrica e percorso delle sollecitazioni per il provino 07.

Pozzo: Ripalta 63 dir - Provino: 03 - Profondità: 1448.90 - 1449.00 [m]

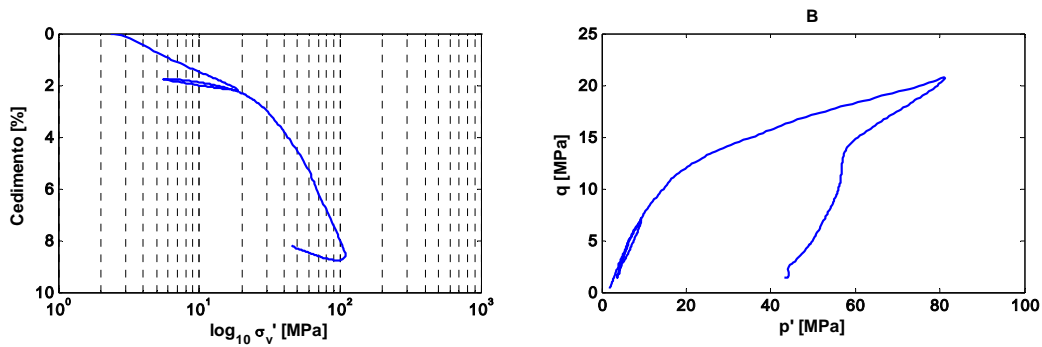


Fig. 4.4.19: Curva edometrica e percorso delle sollecitazioni per il provino 03.

Pozzo: Ripalta 63 dir - Provino: 05 - Profondità: 1483.1 [m]

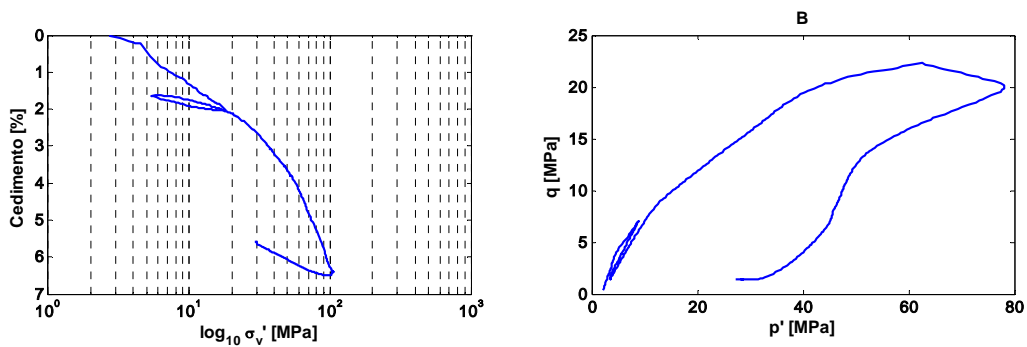


Fig. 4.4.20: Curva edometrica e percorso delle sollecitazioni per il provino 05.

Pozzo: Ripalta 63 dir - Provino: 02 - Profondità: 1491.80 - 1491.90 [m]

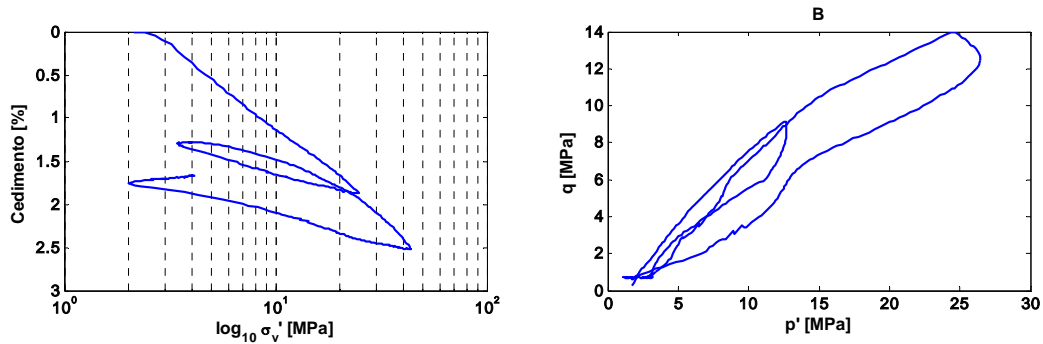


Fig. 4.4.21: Curva edometrica e percorso delle sollecitazioni per il provino 02.

Pozzo: Ripalta 63 dir - Provino: 08 - Profondità: 1494.5 [m]

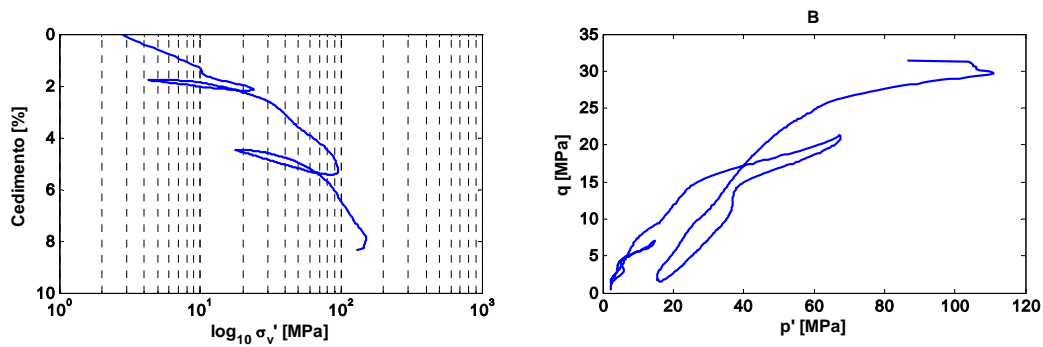


Fig. 4.4.22: Curva edometrica e percorso delle sollecitazioni per il provino 08.

Pozzo: Ripalta 63 dir - Provino: 04 - Profondità: 1593.10 - 1593.20 [m]

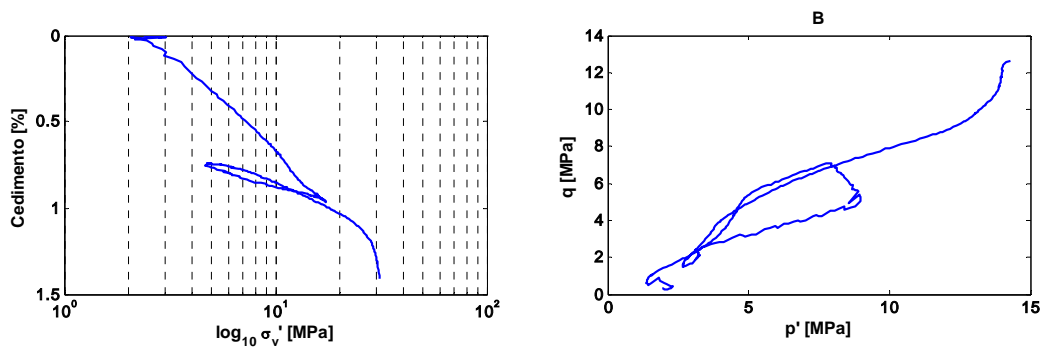


Fig. 4.4.23: Curva edometrica e percorso delle sollecitazioni per il provino 04.



Pozzo: Ripalta 63 dir - Provino: 06 - Profondità: 1596.80 - 1596.90 [m]

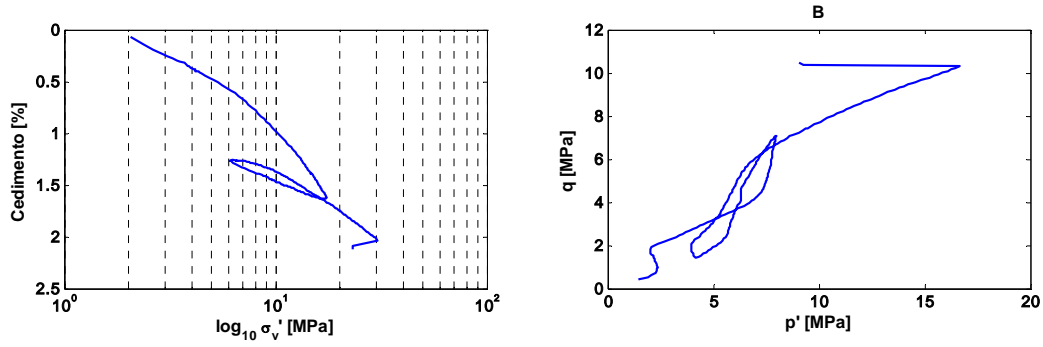


Fig. 4.4.24: Curva edometrica e percorso delle sollecitazioni per il provino 06.