

**Alma Mater Studiorum – Università di Bologna**

**DOTTORATO DI RICERCA  
in Georisorse e Geotecnologie**

**Ciclo XX**

**Settore/i scientifico disciplinari di afferenza: ING-IND 30**

TITOLO della TESI

Valutazione delle *performance* degli scalpelli da perforazione: studi teorici, analisi dati e valutazioni tecnico-economiche

Presentata da: Matteo Magagni

**Coordinatore Dottorato**

**Prof. Ing. Paolo Berry**

**Relatore**

**Prof. Ing. Paolo Macini**

Esame finale anno 2008

## INDICE

|  |     |
|--|-----|
| INDICE.....  | 2   |
| PARTE I: INTRODUZIONE.....   | 4   |
| PARTE II: LE RECENTI EVOLUZIONI DEGLI SCALPELLI PER LA PERFORAZIONE PETROLIFERA.....                                       | 6   |
| 2.1 Introduzione.....  | 6   |
| 2.2 Gli scalpelli a taglienti mobili.....  | 6   |
| 2.3 Gli scalpelli a taglienti fissi.....   | 16  |
| PARTE III: METODI PER LA VALUTAZIONE DELLE <i>PERFORMANCE</i> E PER LA SCELTA DEGLI SCALPELLI.....                         | 23  |
| 3.1 Introduzione.....  | 23  |
| 3.2 Primi studi inerenti la selezione degli scalpelli, il loro utilizzo<br>e la valutazione delle <i>performance</i> ..... | 24  |
| 3.3 Indici per la valutazione delle <i>performance</i> degli scalpelli di perforazione.....                                | 30  |
| 3.3.1 Il Costo/Metro.....  | 30  |
| 3.3.2 La Specific Energy.....  | 34  |
| 3.3.3 Il Drilling Index.....   | 37  |
| 3.3.4 L'Economic Index.....  | 43  |
| 3.3.5 Il Design Index.....   | 43  |
| 3.4 Recenti approcci alla valutazione delle <i>performance</i> degli scalpelli.....  | 46  |
| PARTE IV: L'APPROCCIO DELL'INDUSTRIA ALLA VALUTAZIONE DELLE <i>PERFORMANCE</i> DEGLI SCALPELLI.....                        | 51  |
| 4.1 L'approccio delle Compagnie Petrolifere.....   | 51  |
| 4.2 L'approccio delle Compagnie di Servizio.....   | 59  |
| PARTE V: I MODELLI <i>BIT INDEX</i> ED <i>ECONOMIC INDEX</i> .....   | 68  |
| 5.1 Studi sul processo di ottimizzazione della perforazione.....   | 68  |
| 5.2 Il <i>Bit Index</i> e l' <i>Economic Index</i> .....   | 73  |
| PARTE VI: IL <i>FORMATION DRILLABILITY CATALOG</i> .....   | 78  |
| 6.1 Indagini sull'utilizzo del <i>FDC</i> all'interno del progetto <i>Bit Performance</i> .....                            | 78  |
| 6.2 Indagini sul concetto di perforabilità della formazione.....   | 86  |
| 6.3 Implementazione del <i>database Formation Drillability Catalog</i> .....   | 89  |
| PARTE VII: IL SISTEMA DI SUPPORTO DECISIONALE <i>BIT PERFORMANCE</i> .....   | 99  |
| 7.1 Ambiti di utilizzo.....  | 99  |
| 7.3 L'interfaccia utente ed i risultati.....   | 100 |
| WELL PLANNING.....   | 101 |
| BENCHMARK ANALISYS.....  | 102 |
| BIT PRE-DRILL ANALYSIS.....  | 109 |
| POST WELL ANALYSIS.....  | 111 |
| PARTE VIII: LO STUDIO DI ALCUNI CASI REALI.....  | 112 |
| 8.1 Applicazione dei modelli di perforabilità al <i>Formation Drillability Catalog</i> .....                               | 112 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 8.2   | Prime applicazioni del <i>Bit Index</i> , dell' <i>Economic Index</i> , della <i>Specific Energy</i> e del costo/metro al <i>Formation Drillability Catalog</i> ..... | 122 |
| 8.3   | Il calcolo <i>Bit Index</i> , dell' <i>Economic Index</i> , della <i>Specific Energy</i> e del costo/metro applicato ai pozzi A, B e C.....                           | 128 |
| 8.4   | Il calcolo <i>Bit Index</i> , della <i>Specific Energy</i> e del costo/metro applicato ad ulteriori pozzi del <i>FDC</i> .....  | 143 |
| 8.5   | Il calcolo <i>Bit Index</i> , dell' <i>Economic Index</i> , della <i>Specific Energy</i> e del costo/metro per scalpelli impregnati .....                             | 148 |
| 8.6   | Il calcolo $BI_{RUN}$ applicato al <i>FDC</i> .....   | 154 |
| 8.7   | Studi sui coefficienti parametrici nella valutazione delle <i>performance</i> tramite il $BI_{RUN}$ applicato al <i>FDC</i> .....                                     | 158 |
| PARTE IX: RISULTATI E CRITICITA' DEL METODO.....  |   | 163 |
| BIBLIOGRAFIA.....   |   | 167 |
| ALLEGATO 1: PROCEDURA PER LA COMPILAZIONE DELLE INFORMAZIONI GEOLOGICHE DEL <i>FORMATION DRILLABILITY CATALOG</i> ..... |   | 172 |
| ALLEGATO 2: PARAMETRI CLASSIFICATI NEL DATABASE <i>FDC</i> .....  |   | 173 |
| ALLEGATO 3: ELENCO DELLE PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE PRODOTTE DURANTE IL PROGETTO <i>BIT PERFORMANCE</i> .....           |   | 177 |

## PARTE I: INTRODUZIONE

Lo scalpello è uno degli strumenti più importanti della perforazione: la scelta appropriata del tipo e dei parametri di utilizzo ha un'importanza rilevante ai fini tecnici ed economici.

Lo scopo del presente lavoro di ricerca è quello di contribuire allo sviluppo del Progetto di ricerca e sviluppo denominato *Bit Performance*, promosso da Eni S.p.A. Div. E&P, il cui obiettivo è quello di creare un Sistema di Supporto Decisionale d'analisi e valutazione tecnico/economica delle *performance* degli scalpelli.

Oggigiorno, il personale coinvolto nella progettazione e nell'esecuzione di un pozzo si trova spesso ad avere idee differenti nella scelta degli scalpelli da utilizzare in una determinata fase e/o per perforare una specifica formazione.

La scelta è generalmente effettuata prendendo come riferimento le *performance* degli scalpelli utilizzati in pozzi perforati nella stessa zona, e che hanno attraversato formazioni simili.

Per compiere una scelta ragionata è di fondamentale importanza poter utilizzare metodi per valutare il più oggettivamente possibile le *performance* degli scalpelli: ciò permette di individuare il miglior utensile impiegato, e di poter utilizzare uno scalpello ancora migliore.

Negli ultimi decenni la perforazione, soprattutto quella petrolifera, ha interessato profondità sempre maggiori, incontrando condizioni operative oltremodo critiche; ciò impone tempi di perforazione spesso molto lunghi, e quindi costi elevati, viste le crescenti tariffe di orarie degli impianti di perforazione.

In queste condizioni la scelta dell'utensile di perforazione diventa particolarmente importante, poiché l'utilizzo dello scalpello più idoneo può far risparmiare tempo, sia in fase di perforazione, sia riducendo il numero di manovre necessarie.

Lo scopo del presente lavoro è di contribuire allo sviluppo delle tecniche di valutazione delle *performance* degli scalpelli.

L'attività di ricerca è stata svolta insieme ai tecnici di Eni S.p.A. Div. E&P, con cui è stato costruita la versione base di un Sistema di Supporto Decisionale di analisi e di valutazione tecnico/economica delle *performance* degli scalpelli.

I numeri riportati nel testo tra parentesi quadre indicano i riferimenti bibliografici, elencati in coda alla presente relazione.

## PARTE II: LE RECENTI EVOLUZIONI DEGLI SCALPELLI PER LA PERFORAZIONE PETROLIFERA

### 2.1 Introduzione

Negli ultimi dieci anni gli scalpelli per la perforazione petrolifera hanno subito un notevole sviluppo per sostenere le sempre più ardite richieste degli operatori che, sostenuti dal prezzo crescente del petrolio e del gas, hanno investito ingenti somme per la realizzazione di pozzi sempre più difficili. L'efficienza del processo di perforazione è diventata la chiave di accesso ad un mercato che richiede la realizzazione di pozzi in condizioni ambientali estreme (es. alte temperature ed alte pressioni, perforazione di rocce dure ed abrasive, ecc.) e con complesse architetture e traiettorie. Un processo di perforazione efficiente è legato alle *performance* dell'utensile che esegue materialmente il foro: lo scalpello. Attualmente, le industrie produttrici di scalpelli propongono utensili che, utilizzati in pozzo insieme a strumenti ed attrezzature di controllo della traiettoria estremamente avanzati, sono in grado di fornire *performance* molto superiori rispetto a quelle di qualche decennio fa. Nei prossimi paragrafi saranno analizzati degli scalpelli a taglienti mobili e a taglienti fissi attualmente proposti dalle Case Produttrici ed i loro recenti sviluppi tecnologici.

### 2.2 Gli scalpelli a taglienti mobili

Gli scalpelli a taglienti mobili (o scalpelli a rulli, *rolling cutter bits*, o *rock bits*) sono costituiti da tre coni che, durante la rotazione dello scalpello, rotolano sul fondo del pozzo, anche con un certo strisciamento. Questi scalpelli sono muniti di taglienti di vario tipo che permettono il taglio della roccia a fondo foro e la sua trasformazione in *cutting* di dimensioni adatte al loro trasporto idraulico in superficie. I coni possono avere taglienti di dimensioni variabili con il diametro e la tipologia delle rocce da perforare, possono essere ottenuti per fresatura (MT, *milled tooth*) o costituiti da inserti di carburo di tungsteno (TCI, *tungsten carbonate insert*). Questi ultimi sono più adatti per rocce tenere, mentre i primi per formazioni più dure.

Le *performance* di questa tipologia di scalpelli sono in gran parte determinate dalla tecnologia dei taglienti e dalla durabilità dell'utensile, in termini sia di vita del tagliente che di vita efficace del cuscinetto. Per questo motivo, le nuove metodologie di progettazione, i nuovi tipi di cuscinetti sigillati, guarnizioni, nuovi cuscinetti, nuovi metodi di indurimento superficiale con l'utilizzo di materiali tecnologicamente avanzati e l'ottimizzazione dell'efficienza idraulica sono alcuni degli aspetti fondamentali studiati dalle aziende produttrici affinché i loro utensili possano raggiungere le migliori *performance*.

Per quanto riguarda gli scalpelli a denti fresati, *Smith Bits* ([www.smithbits.com](http://www.smithbits.com)) propone la serie *Xplorer Expanded<sup>TM</sup>*, disponibili dal diametro 8-1/2" fino al 17-a/2". La struttura tagliente è progettata per ottimizzare l'azione di rimozione della roccia nelle formazioni più tenere, mantenendo un buon compromesso tra la velocità di avanzamento e la durabilità. Per quanto riguarda la resistenza all'usura e la durabilità, i denti fresati degli scalpelli della serie *Xplorer Expanded<sup>TM</sup>* possono essere induriti con un rivestimento superficiale (*hardfacing*) costituito da un materiale brevettato denominato *MIC2<sup>TM</sup>*. In generale, le aziende produttrici di scalpelli utilizzano, per l'indurimento dei denti, delle miscele quasi tutte coperte da brevetti o diritti di proprietà, con diverse percentuali di carburo di tungsteno sinterizzato e macro-cristallino di diversa composizione : la combinazione di granulometrie diverse conferisce inoltre al materiale di rivestimento tenacia e resistenza all'abrasione.



Figura 1: scalpello a taglienti mobili, con denti fresati della serie *Xplorer Expanded<sup>TM</sup>*, *Smith Bits*

Gli scalpelli della serie *Xplorer Expanded™* sono equipaggiati con il sistema di protezione dei cuscinetti denominato *Gemini® Dynamic Twin Seal System* (disponibile anche per gli scalpelli ad inserti). Una buona protezione dei cuscinetti negli scalpelli a taglienti mobili permette un utilizzo prolungato e con buone *performance* nella perforazione in condizioni ambientali difficili (ad es. alte temperature ed alte pressioni, ecc.). Il sistema *Gemini® Dynamic Twin Seal System* consiste nell'accoppiamento di due guarnizioni: quella primaria protegge il cuscinetto mentre la seconda protegge quella primaria (Figura 2), limitando l'infiltrazione di materiali fini ed abrasivi all'interno del cuscinetto.

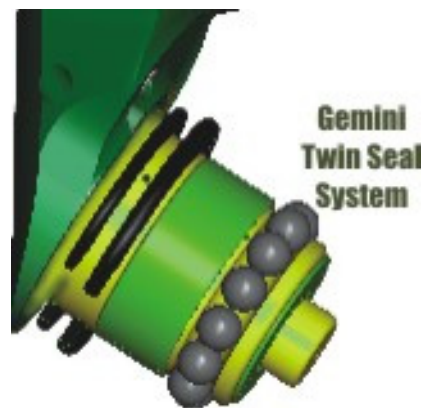


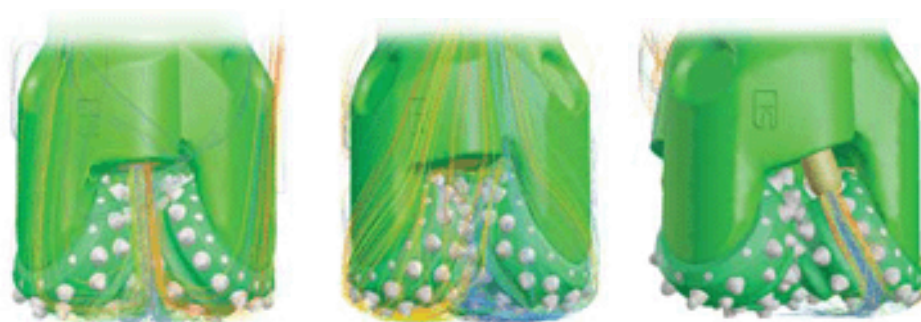
Figura 2: *Gemini® Dynamic Twin Seal System*

Il materiale con cui sono costruite le guarnizioni è solitamente costituito dalla combinazione di un elastomero con un'alta resistenza all'usura e da un materiale "energizzante" che esercita una consistente, ma non eccessiva, pressione di contatto. La sezione della guarnizione primaria ha un profilo tale da produrre la massima protezione del cuscinetto.

Gli scalpelli *Xplorer Expanded™* sono inoltre equipaggiati con il sistema *Flex-Flo Adaptive Hydraulics* (disponibile anche per gli scalpelli ad inserti) che consiste nella possibilità di scelta di un particolare sistema idraulico per massimizzare la velocità di avanzamento e/o permettere una migliore pulizia del foro. Il sistema *Flex-Flo Adaptive Hydraulics* prevede tre diverse configurazioni: (1) *S-Flo (Standard Flow)* che utilizza



tre identiche dusi per le applicazioni con alta percentuale di materiale solido in sospensione nel fango e per la perforazione di formazioni abrasive; (2) *X-Flo* (*Cross Flow*) per ottimizzare la pulizia del foro, (3) *V-Flo* (*Vectored Flow*) per quando sono richieste alte velocità di avanzamento (Figure 3 e 4).



*S-Flo X-Flo V-Flo*

Figura 3: *Flex-Flo Adaptive Hydraulics*

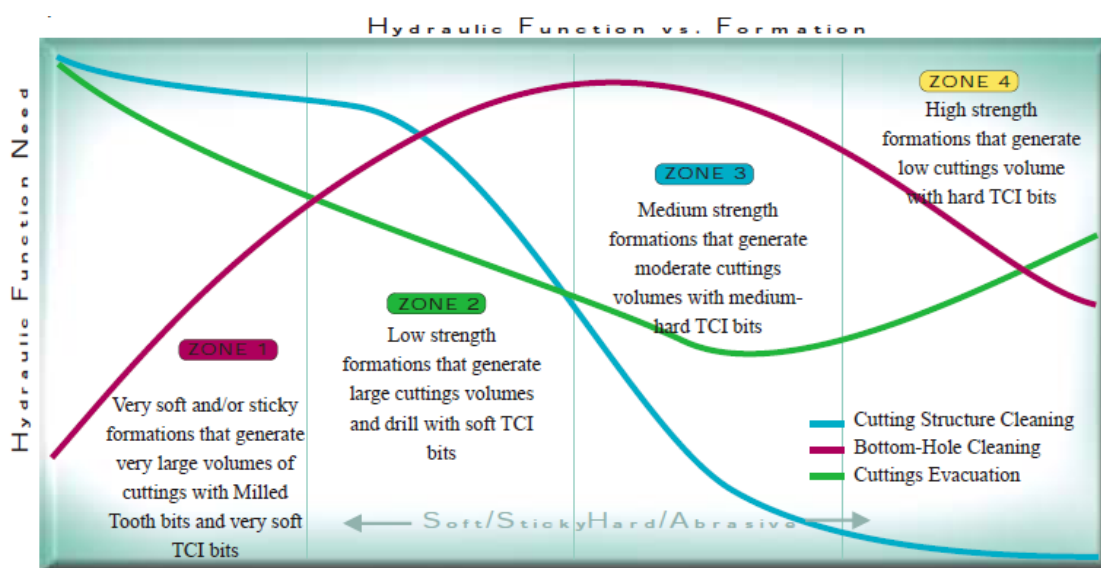


Figura 4: Abaco proposto da *Smith Bits* per la scelta delle caratteristiche idrauliche dello scalpello.

Nel panorama degli scalpelli ad inserti, *Smith Bits* ([www.smithbits.com](http://www.smithbits.com)) propone la linea *FH* che combina la duttilità per svariate applicazioni all'alta velocità di avanzamento. Una linea di prodotti particolari e quella *Shamal*<sup>®</sup>, che è stata sviluppata per perforare le formazioni carbonatiche del *Middle East*. Questo scalpello è un esempio di sviluppo congiunto di tecnologia tra l'Operatore e la Compagnia di Servizio. La struttura tagliente degli scalpelli *Shamal*<sup>®</sup> è costituita da una miscela di carburo di tungsteno, sviluppata e brevettata da *Smith Bits*, adatta per resistere alle alte temperature e diminuire il rischio di rotture. Questi taglienti sono denominati *Dog Bone*<sup>®</sup> (Figura 5).



Figura 5: *Shamal*<sup>®</sup> (a sinistra) e gli inserti *Dog Bone*<sup>®</sup> (a destra).

Un' ulteriore innovazione in materia di inserti è la tipologia *ACE* (*Asymmetric Conic Edge*), un ibrido tra l'inserto conico ed il *chisel*, più aggressivo nelle formazioni tenere rispetto ad un inserto conico standard (Figura 6).



Figura 6: Inserto *ACE*

Recentemente *Smith Bits* ha progettato uno scalpello bicono denominato *TCT<sup>TM</sup>*, ([www.smithbits.com](http://www.smithbits.com)), cercando di eliminare le limitazioni della vecchia tecnologia (ad es. elevate vibrazioni, tendenza nel perforare un foro a spirale, ecc.) e proponendo un utensile disponibile sia a denti fresati che con inserti in carburo di tungsteno. *TCT<sup>TM</sup>* (Figura 7) è stato progettato per rispondere a particolari esigenze di perforazione, come i pozzi *extended reach* o quelli con traiettorie caratterizzate da elevata inclinazione.



Figura 7: *TCT<sup>TM</sup>* bit

*Ultramax<sup>TM</sup>* è una linea di scalpelli a taglienti mobili proposta da *Hughes Christensen* ([www.bakerhughes.com/hcc](http://www.bakerhughes.com/hcc)) adatta per perforazioni con elevata velocità di rotazione (*RPM*). Disponibili sia a denti fresati che con inserti in carburo di tungsteno, questi scalpelli possono essere dotati del sistema di ritenuta denominato *SEM Bearing Package* che consiste in un singolo elemento *energizer* come evidenziato nella figura seguente.



Figura 8: *SEM Bearing Package*

In pratica, la tecnologia *SEM* è sviluppata per rendere più robusto e maggiormente efficace il sistema di ritenuta.

Inoltre, gli scalpelli della serie *Ultramax<sup>TM</sup>* sono caratterizzati dal sistema di stabilizzazione *BOSS*, che permette di migliorare la stabilità dell'utensile (Figura 9) e diminuire l'usura della struttura tagliente ([www.bakerhughes.com/hcc](http://www.bakerhughes.com/hcc)).

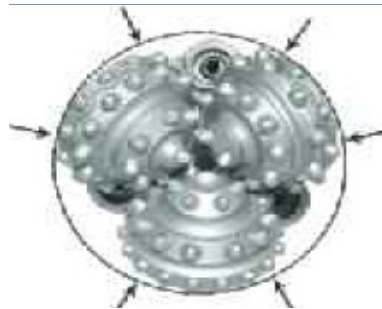


Figura 9: *BOSS Stabilization*.

Per le attività di perforazione nelle formazioni medie e tenere, *Hughes Christensen* ([www.bakerhughes.com/hcc](http://www.bakerhughes.com/hcc)) propone la serie *GX<sup>TM</sup>* ad inserti di carburo di tungsteno, il cui grado è ottimizzato per resistere maggiormente all'usura provocata da eventuali infiltrazioni di formazioni abrasive (Figura 10).

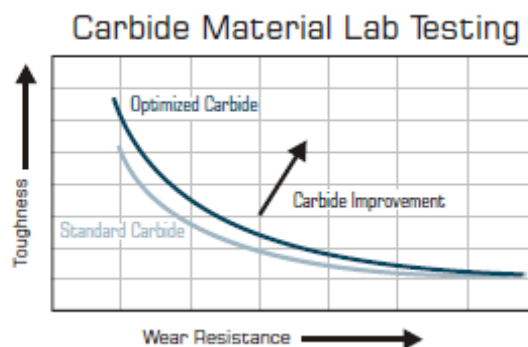


Figura 10: *test* di laboratorio per lo studio del materiale degli inserti della serie *GX<sup>TM</sup>*.

Anche la forma e la posizione dei taglienti caratterizzano lo scalpello  $GX^{TM}$ : la forma è più allungata rispetto a quella *standard* ed inoltre alcuni taglienti aggiuntivi, di dimensione minore sono posizionati tra quelli più grandi perché l'utensile risulti più durevole (Figura 11).



Figura 11: Forma (a sinistra) e posizione (a destra) dei taglienti nello scalpello  $GX^{TM}$ .

Gli scalpelli della serie  $GX^{TM}$  possono essere equipaggiati con particolari sistemi di ritenuta: oltre all'elastomero denominato *G3*, la cui sezione non cilindrica è studiata per ottimizzare il processo di ritenuta, questi scalpelli possono essere equipaggiati con il *Mud Wiper*, che, come si vede nella figura seguente, è utile per proteggere l'entrata di materiale contaminante nel cuscinetto.

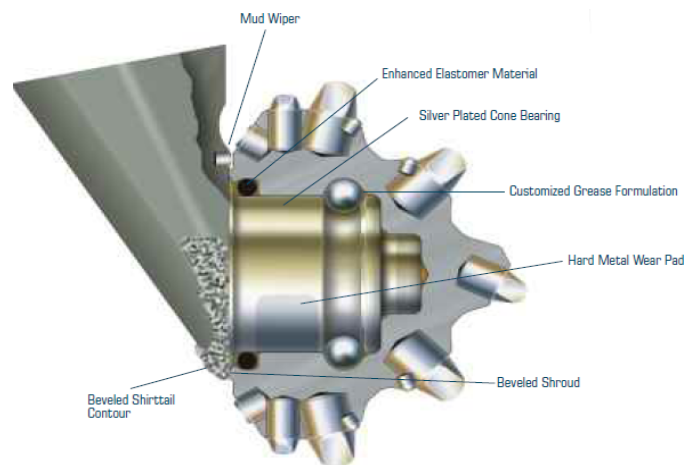


Figura 12: Sezione dello scalpello  $GX^{TM}$ .

Come *Smith Bits* anche *Hughes Christensen* propone configurazioni idrauliche da scegliere in funzione delle condizioni di fondo foro che si vorrebbero ottenere. Normalmente nella configurazione idraulica convenzionale la maggior parte dell'energia idraulica è direzionata verso la formazione da perforare, mentre nelle configurazioni denominate *Clean Sweep* ed *XStream* le duse sono posizionate per favorire la pulizia della struttura tagliente e per creare una maggiore turbolenza a fondo foro (Figura 13).

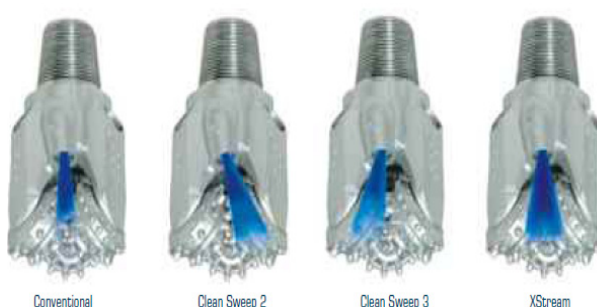


Figura 13: *GX Hydraulics*

Per applicazioni in rocce dure ed abrasive *Hughes Christensen* propone gli utensili della serie *HardRock* (HR, [www.bakerhughes.com/hcc](http://www.bakerhughes.com/hcc)). La struttura di questi scalpelli è particolarmente compatta, e l'utilizzo di rinforzi in carburo di tungsteno nelle zone più soggette all'usura ed un aumento della densità dei taglienti rappresentano gli elementi caratterizzanti di questa tipologia di utensili (Figura 14).

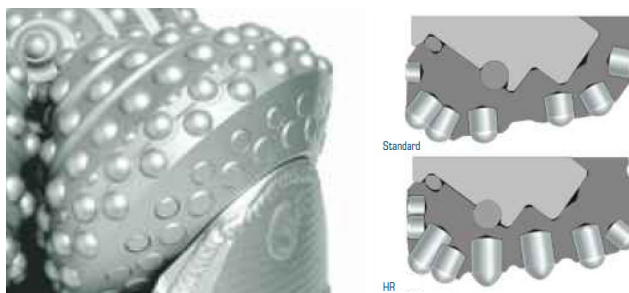


Figura 14: utilizzo dei rinforzi in carburo di tungsteno (sinistra) ed aumento della densità dei taglienti (destra) negli scalpelli della serie *HR*.

*Security DBS* ([www.halliburton.com](http://www.halliburton.com)) propone gli scalpelli *X Series™*, disponibili sia a denti fresati che ad inserti in carburo di tungsteno, che presentano la saliente caratteristica di essere *Energy Balanced™*, cioè progettati perché il peso sullo scalpello sia ripartito uniformemente sui tre coni, migliorando le *performance* in termini di velocità di avanzamento e durata dell'utensile in pozzo.

*Reed Hycalog* ([www.reedhycalog.com](http://www.reedhycalog.com)) offre gli scalpelli *Titan™*, disponibili sia a denti fresati che ad inserti in carburo di tungsteno. I cuscinetti a rulli hanno un profilo logaritmico, proposto comunque anche da altri *Competitor*, che tende a ridurre le zone particolarmente stressate del cuscinetto e soggette ad eccessiva fatica (Figura 15).



Figura 15: cuscinetti a rulli con profilo convenzionale (sinistra) e logaritmico (destra).

Gli scalpelli della serie *Titan™* sono equipaggiati con un sistema d'inserimento del tagliente nel cono denominato *MatchFit™* (Figura 16).



Figura 16: *MatchFit™* (sopra) e geometria dei taglienti (sotto) negli scalpelli *Titan™*

### 2.3 Gli scalpelli a taglienti fissi

Gli scalpelli a taglienti fissi (*Fixed Cutter Bits*) sono utensili monoblocco, con il corpo in acciaio o carburo di tungsteno e taglienti diamantati che perforano la roccia essenzialmente tramite uno sforzo di taglio e abrasione, derivante dal peso e dalla rotazione applicati allo scalpello. Rispetto agli scalpelli a taglienti mobili, il vantaggio principale degli scalpelli a taglienti fissi è quello di non avere parti in rotazione, eliminando quindi i rischi intersechi legati ad elementi mobili che possono usurarsi e distaccarsi dal corpo dello scalpello rimanendo a fondo foro.

La maggior parte degli utensili a taglienti fissi è costituita dagli scalpelli *PDC* (*Polycrystalline Diamond Compact*), che prendono il nome dalla struttura tagliente di cui sono dotati: nati per la perforazione di rocce tenere e mediamente dure, il loro campo di applicazione si è ampliato negli anni, facendo di questo tipo di scalpello quello attualmente più utilizzato. Per la perforazione di rocce dure ed abrasive la tecnologia propone sia gli scalpelli impregnati (*Impregnated Bits*) che quelli a diamanti naturali (*ND, Natural Diamond Bits*).

Le *performance* degli scalpelli a taglienti fissi sono in gran parte determinate dalla tecnologia dei taglienti utilizzati, dalla durabilità dell'utensile e, in particolare per i *PDC*, dalla stabilità dinamica.

*Smith Bits* ([www.smithbits.com](http://www.smithbits.com)) propone tre principali tipologie di *PDC*: *ARCS<sup>TM</sup>*, (*Alternative Radius Curvature Stabilization*), *DUAL TORQUE<sup>®</sup>* e *ROTOSTEER<sup>®</sup>*. Gli scalpelli *ARCS<sup>TM</sup>* sono caratterizzati dalla presenza di differenti dimensioni di *cutter PDC*, per creare un'unica struttura di taglio al fine di ottimizzare la velocità di avanzamento, la stabilità e la durezza (Figura 17).





Figura 17: *ARCS™ Bit* (sinistra) ed un particolare della struttura tagliente (destra).

Per l'ottimizzazione dell'efficienza dello scalpello *PDC* nella perforazione direzionata, *Smith Bits* ha sviluppato lo scalpello *DUAL TORQUE®* (Figura 18).



Figura 18: *DUAL TORQUE® Bit*

Per applicazioni con sistemi di tipo *steerable*, *Smith Bits* ha sviluppato lo scalpello *ROTOSTEER®* che prevede una configurazione del *gauge*, studiata e brevettata per ottimizzare il controllo direzionale tramite l'applicazione di ulteriori taglienti rispetto a quelli montati normalmente, come evidenziato nella figura seguente.

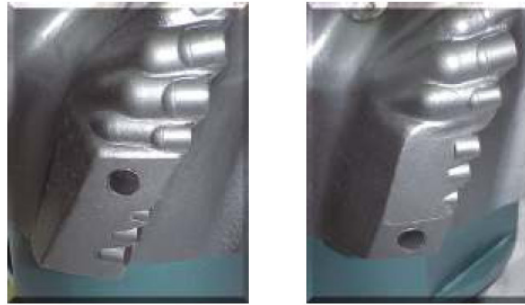


Figura 19: particolare delle lame dello scalpello *ROTOSTEER*®

Negli anni passati, un limite di utilizzo degli scalpelli PDC erano le operazioni di perforazione che sviluppavano alte temperature a fondo foro, per cui furono introdotti gli utensili TSP (*Thermal Stable Polycrystalline*). Allo stato attuale le case produttrici di utensili hanno sviluppato nuove tecnologie e nuovi materiali per eliminare questa limitazione negli scalpelli PDC. *Smith Bits* ([www.smithbits.com](http://www.smithbits.com)) propone il tagliente denominato *HOT*<sup>TM</sup>, studiato per le alte temperature e per la perforazione di formazioni cosiddette “difficili”.

Analisi con il metodo degli elementi finiti hanno ottimizzato il processo di ricerca e sviluppo del cutter PDC denominato *GeoMax*<sup>TM</sup>, che presenta lo spessore di diamante tra i più alti sul mercato (circa 3 mm).

Per la perforazione di rocce dure ed abrasive, *Smith Bits* offre una serie di scalpelli impregnati denominata *Kinetic*<sup>TM</sup> (Figura 20). La struttura che esegue materialmente la perforazione è costituita da inserti denominati GHI (*Grid Hot Pressed Insert*) costituiti da una combinazione di diamante e carburo di tungsteno. La geometria della struttura tagliente è ottimizzata per avere la maggior parte di inserti a contatto con la formazione da perforare. Questi scalpelli sono efficaci quando sono accoppiati ad una turbina o ad un PDM (*Positive Displacement Motor*) ad alta velocità.



Figura 20: *Kinetic<sup>TM</sup> bit*

*Genesis* è una gamma di scalpelli *PDC* proposta da *Hughes Christensen* ([www.bakerhughes.com/hcc](http://www.bakerhughes.com/hcc)). Tali *bit* possono essere equipaggiati con alcuni taglienti posizionati sulle parti più sensibili delle lame dello scalpello per ridurre l'usura (*BRUTE cutter*, Figura 21).

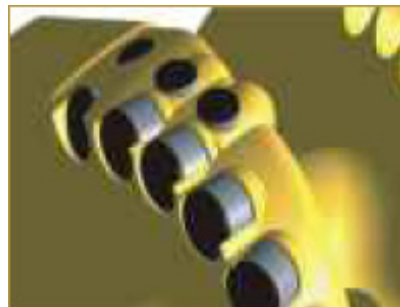


Figura 21: *BRUTE cutter*

Gli scalpelli della serie *Genesis* possono montare anche taglienti appositamente sviluppati per applicazioni particolarmente impegnative (alte temperature, condizioni ambientali difficili, Figura 22).



Figura 22: *Zenith cutter* sviluppato per perforazioni in condizioni difficili

*HedgeHog* è lo scalpello impregnato prodotto *Hughes Christensen* ([www.bakerhughes.com/hcc](http://www.bakerhughes.com/hcc)) per la perforazione di rocce dure ed abrasive. Come anche negli scalpelli di *Smith Bits* (*Kinetic<sup>TM</sup>*) la struttura tagliente è “interrotta” tra una tagliente e l’altro, per avere a disposizione più diamante possibile a contatto con la formazione da perforare (Figura 23).



Figura 23: *HedgeHog bit* (sinistra) e particolare della struttura tagliente (destra)

*FAST* (Figura 24) è la tecnica attualmente alla base dello sviluppo degli scalpelli a taglienti fissi di *Security DBS* ([www.halliburton.com](http://www.halliburton.com)).

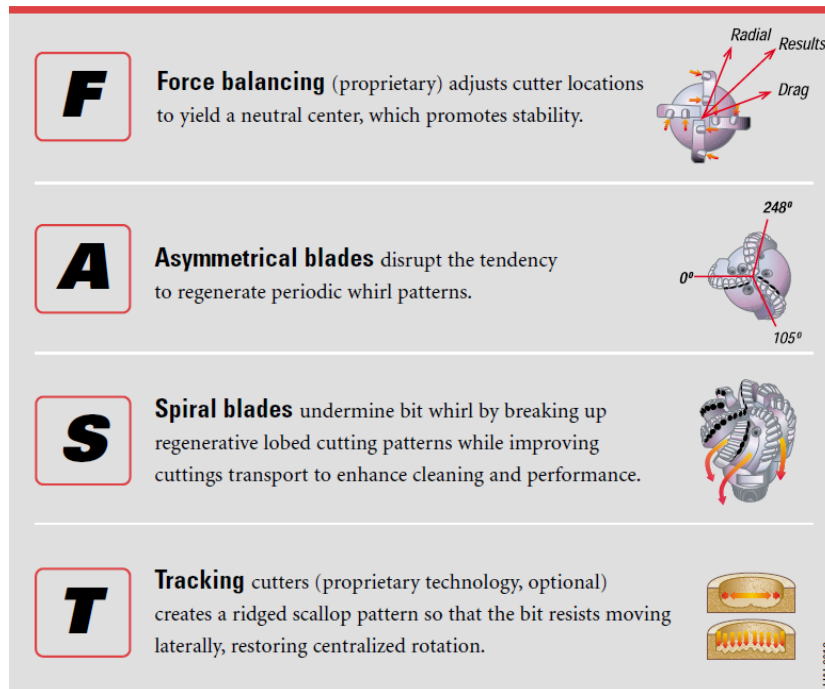


Figura 24: tecnica *FAST* di *Security DBS*

*Security DBS* ha sviluppato una classe di taglienti *PDC* denominata *Elite* per ottenere una maggiore resistenza all’impatto ed all’abrasione rispetto a quelli tradizionali (Figura 25).

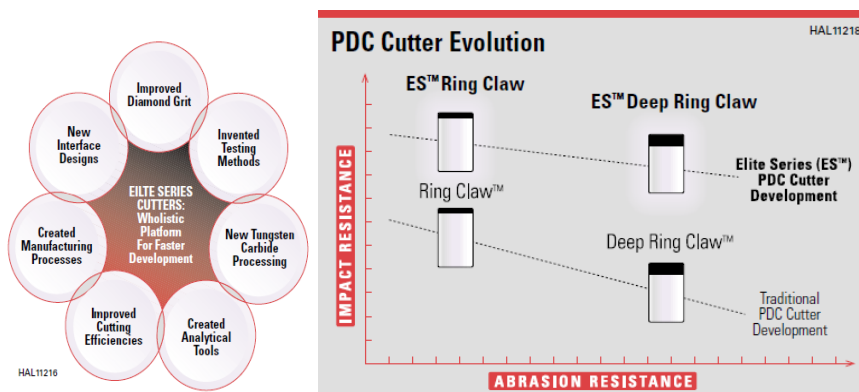


Figura 25: piattaforma di sviluppo della serie *Elite* (sinistra) e confronto tra taglienti tradizionali e la serie *Elite* (destra).

Gli scalpelli *PDC* per rocce dure di *Security DBS* possono montare il tagliente  $Z3^{TM}$ , sviluppato per aumentare le *performance* di questi utensili in un campo che storicamente era riservato agli scalpelli a taglienti mobili (Figura 26).

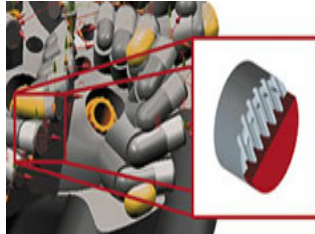


Figura 26: tagliente  $Z3^{TM}$  di *Security DBS*.

Attualmente tutte le industrie produttrici di scalpelli pongono una vasta gamma di prodotti per ogni condizione di perforazione.

Le tecniche di progettazione degli scalpelli sono sempre più avanzate ma, come si potrà leggere nei prossimi paragrafi, non lo sono altrettanto le metodologie di valutazione delle loro *performance*.

Disporre di un metodo efficace per la valutazione delle *performance* degli scalpelli, anche in funzione dell'attuale tecnologia, è uno degli obiettivi del Progetto *Bit Performance* promosso da Eni S.p.A., Divisione E&P.

## **PARTE III: METODI PER LA VALUTAZIONE DELLE *PERFORMANCE* E PER LA SCELTA DEGLI SCALPELLI**

### **3.1 Introduzione**

In fase di progettazione, pianificazione ed esecuzione di un pozzo, il programma scalpelli ha da sempre rappresentato un punto abbastanza critico, soprattutto per la difficoltà di poter prevedere a priori le *performance* delle tipologie di scalpello da adottare, correlate con le formazioni attese lungo il sondaggio. Inoltre, è ben evidente che l'ottimizzazione generale delle operazioni di perforazione non può prescindere dall'ottimizzazione dello stesso programma scalpelli.

Il termine ottimizzazione indica il raggiungimento di un obiettivo desiderato, al minor costo, tramite l'uso di efficaci procedure operative [1]. Ciò è tanto più vero quanto più la perforazione interessa obiettivi "difficili", in altre parole pozzi profondi e con traiettorie complesse, perforati in zone a geologia complicata e/o condizioni ambientali estreme, dove l'ottimizzazione del tempo impianto è di primaria importanza.

Oggi, la scelta scalpelli è generalmente effettuata prendendo come riferimento le *performance* degli scalpelli utilizzati in pozzi perforati nella stessa zona, e che hanno attraversato formazioni simili a quelle da perforare. Uno scalpello che, in una data fase, presenta buone *performance* in un pozzo, potrebbe essere utilizzato nella stessa fase in altri pozzi, per formazioni simili. Per compiere scelte ragionate è necessario avere informazioni e dati per definire il termine *performance* per gli utensili utilizzati in pozzo.

In questo ambito tecnologico, vari autori [1-18] hanno cercato di studiare, in primo luogo, il problema della valutazione delle *performance* degli scalpelli e, successivamente, la scelta dell'utensile più adatto da discendere in pozzo. Gli approcci sviluppati negli anni sono molteplici: *IADC* ha classificato gli scalpelli secondo determinati criteri per agevolarne la scelta, è stato associato allo scalpello utilizzato un valore numerico (generalmente denominato "indice") che, sotto determinate condizioni, sia in grado di sintetizzare le informazioni sull'andamento dello scalpello in pozzo e,

recentemente, grazie all'ausilio di sistemi di calcolo, si è diffuso l'uso dei metodi statistici e predittivi.

E' bene ricordare che, nel tempo, lo sviluppo tecnologico degli scalpelli di perforazione è sempre stato più veloce di quello dei metodi di valutazione delle loro *performance*.

Nei prossimi paragrafi sono esposti e commentati alcuni metodi ritenuti indicativi per la valutazione delle *performance* degli scalpelli e conseguentemente per la loro scelta. Tali metodi derivano prevalentemente da studi effettuati dal 1960 ad oggi, inizialmente riferiti a scalpelli a taglienti mobili fino ad arrivare agli scalpelli a taglienti fissi.

### **3.2 Primi studi inerenti la selezione degli scalpelli, il loro utilizzo e la valutazione delle *performance***

Un metodo in esame [2] è stato realizzato con l'obiettivo di identificare una procedura che, utilizzando le informazioni di *log* elettrici, *log* radioattivi ed i parametri di perforazione, permetta di ottimizzare le operazioni in aree con improvvisi cambi di formazione geologica. Dopo alcuni *test* su pozzi di riferimento, i risultati hanno portato un significativo miglioramento delle *performance* degli scalpelli [2].

La selezione dello scalpello è uno degli aspetti più importanti del programma di perforazione di un pozzo. Questo studio è significativo perché utilizza i dati rilevati durante la perforazione (*Bit Record*), insieme ad alcuni *log* per procedere ad un'ottimale selezione dello scalpello in funzione della formazione da perforare.

La perforazione di una battuta è fatta prevalentemente a velocità di avanzamento costante: la normale pratica prevede l'aumento del peso sullo scalpello (*WOB*) quando l'utensile inizia ad essere usurato. Lo scalpello è sostituito quando la sua usura causa un'eccessiva torsione ed un'inaccettabile velocità di avanzamento. L'esperienza prevede l'utilizzo di un moderato *WOB* ed un'elevata velocità di rotazione (*RPM*) per perforare le formazioni *soft*. Un valore maggiore di *WOB* ed un *RPM* più moderato sono ottimali per la perforazione delle formazioni *hard*.

L'analisi dei *log* di pozzo e dei valori dei parametri registrati durante la perforazione permette di identificare quale formazione è stata perforata. I *log* considerati nello studio



sono l' *Induction Electrical Survey Log* ed il *Gamma Ray Neutron Log*. Il primo è utilizzato per avere indicazioni della permeabilità e della porosità della roccia perforata: è funzionale per differenziare le argille (impermeabili e porose) dalle altre formazioni più permeabili. Il secondo permette essenzialmente di avere una misura della porosità [2]. Se la litologia della zona è conosciuta, l'identificazione delle varie formazioni è possibile tramite l'utilizzo dei *log*.

Graficando l'andamento dei *log* in funzione della profondità si possono osservare gli effetti che le variazioni delle formazioni geologiche perforate hanno sulla velocità di avanzamento (Figura 27).

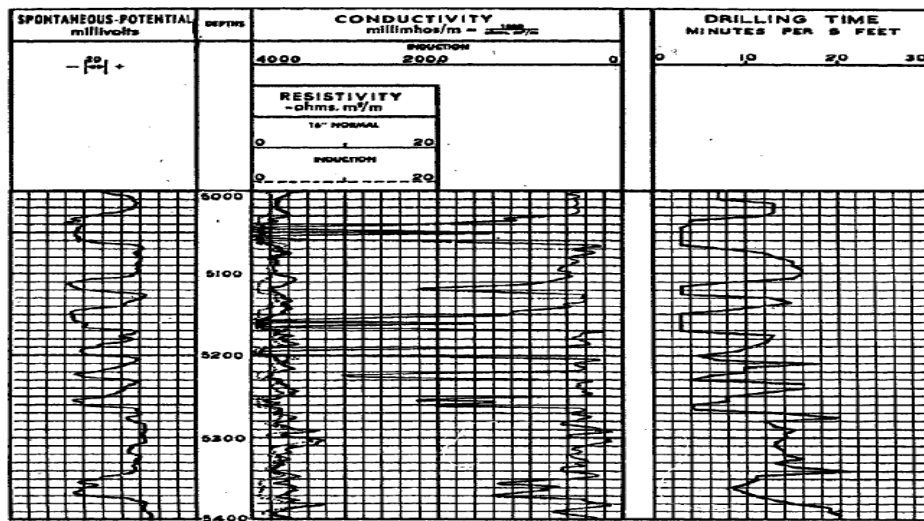


Figura 27: effetti dei cambi di formazione sulla velocità di avanzamento.

In funzione di quanto sopra esposto, lo studio descrive la pianificazione di una battuta di perforazione. La prima fase consiste nell'avere a disposizione le informazioni in merito alle *performance* degli scalpelli in funzione delle formazioni perforate, in particolare: *bit record*, *log* di pozzo, tempi di perforazione ed usura degli utensili. L'autore rileva quanto è difficile avere a disposizione una buona qualità di queste informazioni: nello specifico i rapporti scalpelli e le valutazioni dell'usura degli utensili devono essere compilati in modo scrupoloso e da persone qualificate [2].

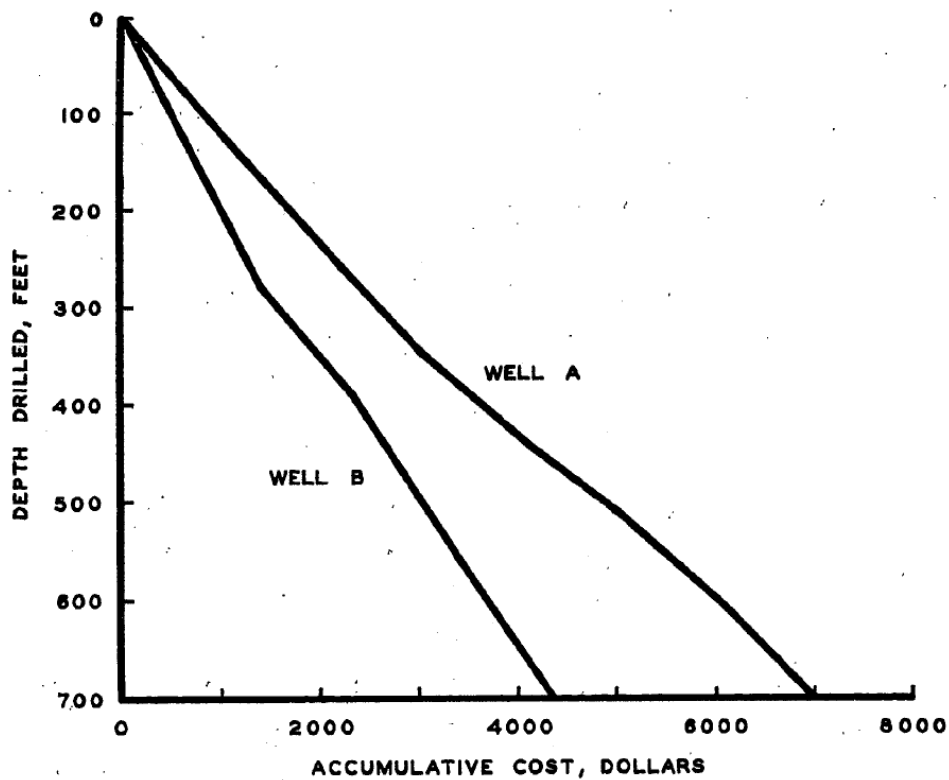
Dopo aver graficato l' *Induction Electrical Survey Log*, il *Gamma Ray Neutron Log*, il tempo di perforazione e l'usura dello scalpello si deducono le varie sequenze delle

formazioni geologiche perforate ed i loro effetti sulla velocità di avanzamento. Successivamente si procede alla selezione dello scalpello ed alla definizione delle migliori tecniche operative.

I concetti espressi sopra sono stati applicati ad un caso pratico in cui è stato valutato le *performance* di alcuni scalpelli utilizzati in un pozzo (*well A*) perforato nella zona di *Cass Country (East Texas)*: l'esperienza fatta dall'analisi dei *log* e dei *bit record* è stata utilizzata nella pianificazione e nell'esecuzione di un secondo pozzo (*well B*) nella stessa area.

I risultati del processo di ottimizzazione delle *performance* sono riportati nel grafico della figura seguente, dove si nota: l'abbattimento dei costi del pozzo *B* rispetto al pozzo *A*, la diminuzione del numero di *bit* utilizzati nel pozzo *B* rispetto al pozzo *A*, l'aumento dell'intervallo medio perforato da ogni singolo scalpello e della velocità di avanzamento nel pozzo *B* rispetto al pozzo *A*.

Questo studio, esposto nelle sue linee essenziali, risulta interessante in quanto specifica come un'analisi congiunta delle informazioni (*log* e *bit record*) a disposizione sui pozzi già perforati nella stessa area, sia fondamentale in fase di pianificazione ed esecuzione delle operazioni di un nuovo pozzo [2].



|                            | <u>WELL A</u> | <u>WELL B</u> |
|----------------------------|---------------|---------------|
| TOTAL FOOTAGE DRILLED      | 688           | 704           |
| NUMBER OF BITS             | 7             | 4             |
| FOOTAGE PER BIT            | 98.3          | 176           |
| TOTAL ROTATING TIME, HRS.  | 75.5          | 50.7          |
| AVG. DRILLING RATE, FT/HR. | 9.1           | 13.9          |
| TOTAL COST, DOLLARS        | \$6,994       | \$4,393       |
| AVG. COST PER FOOT         | \$10.16       | \$6.24        |

Figura 28: comparazione tra i due pozzi *A* e *B* perforati in *Cass Country*. Il pozzo *B* è stato pianificato utilizzando le informazioni ricavate dalle analisi sul pozzo *A*.

La necessità di incorporare la valutazione delle *performance* degli scalpelli all'interno delle operazioni di pianificazione di un pozzo (*well planning*) è alla base dello sviluppo di una prima banca dati (denominata *bit bank*) riferita a pozzi perforati nel Golfo della Louisiana negli anni settanta (*Offshore Louisiana Gulf Coast*) [4].

Lo scopo della creazione di questa raccolta di dati è la valutazione delle *performance* degli scalpelli discesi in pozzo, da utilizzare durante le operazioni di *well planning*.

Lo studio risulta interessante perché la banca dati è costruita considerando svariate informazioni, per identificare gli scalpelli utilizzati (es. la compagnia che lo ha prodotto, il pozzo in cui è stato utilizzato, ecc.), dati di natura meccanica (es. peso sullo scalpello, velocità di rotazione, ecc.), idraulica (es. potenza idraulica dissipata allo scalpello), la velocità di avanzamento dell'utensile, l'intervallo perforato, l'usura dei denti e del diametro al momento dell'estrazione dello scalpello, informazioni inerenti alle formazioni geologiche perforate (es. percentuale di sabbia), i costi sostenuti.

I dati classificati nella *bit bank* sono stati utilizzati per analisi statistiche che hanno permesso d'individuare uno *standard* di riferimento per la loro classificazione [5], ma soprattutto per lo sviluppo di alcuni modelli previsionali [3] da utilizzare in fase di pianificazione del pozzo (es. velocità di avanzamento dell'utensile, usura dello scalpello, valore della coppia, ecc.).

Perché tali modelli possano essere utilizzati, essi sono stati tradotti in forma grafica in un abaco. Nella figura seguente è riportato un esempio dell'abaco da utilizzare per formazioni *soft*: identificati il valore del peso sullo scalpello, della velocità di rotazione, della potenza idraulica disponibile al *bit*, seguendo un percorso prestabilito, costituito dalla valutazione di indici intermedi (es. *DA*, *BP*, ecc.) si riesce a stimare la velocità di avanzamento presunta in funzione dei dati classificati nella *bit bank*.

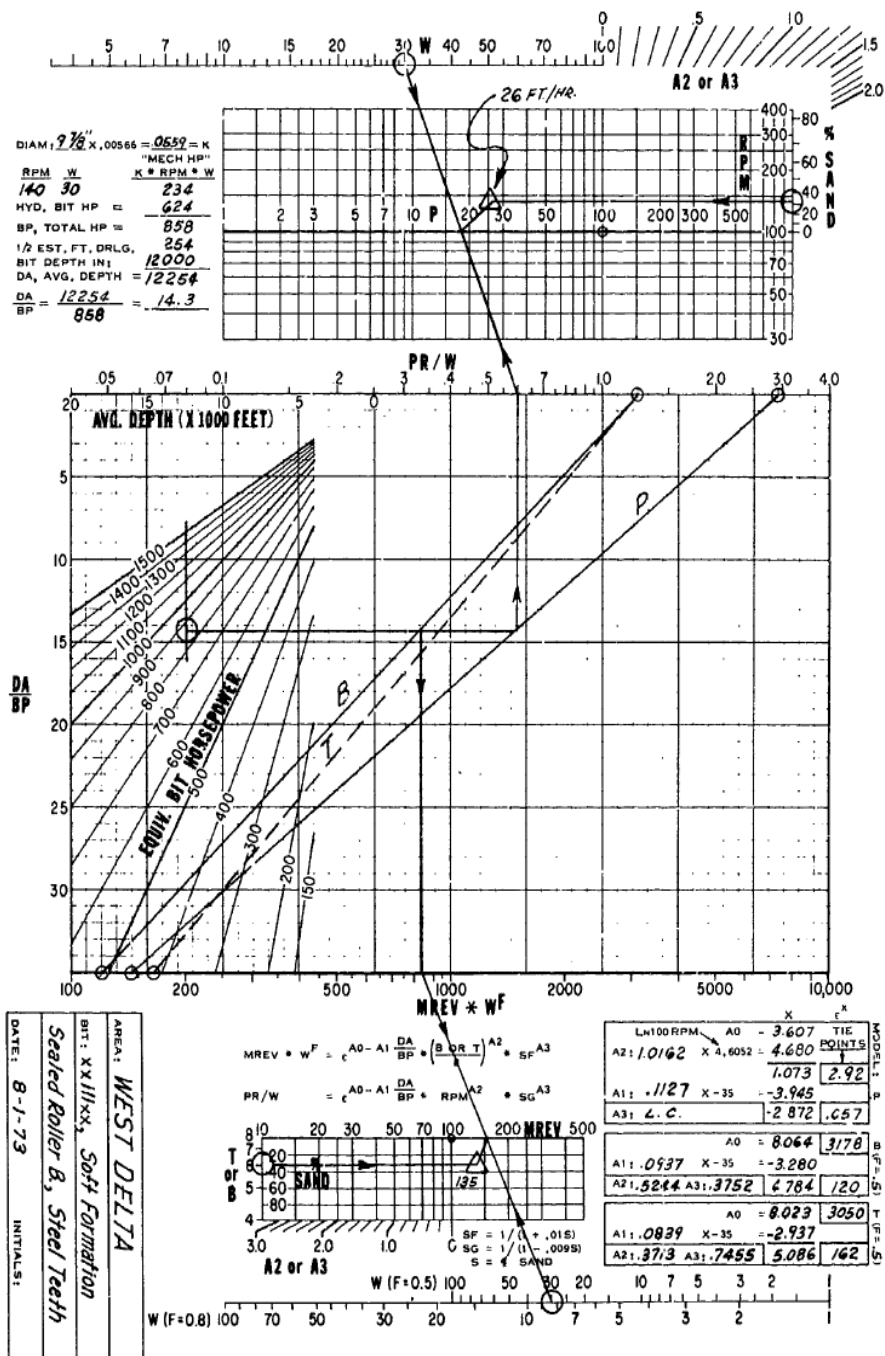


Figura 29: abaco per la determinazione della velocità di avanzamento presunta in base ai dati classificati nella bit bank.

### 3.3 Indici per la valutazione delle *performance* degli scalpelli di perforazione

In questo paragrafo sono presentati alcuni modelli matematici, denominati indici, utilizzabili nelle valutazioni delle *performance* degli scalpelli. Con l'utilizzo di un indice si riesce a quantificare numericamente il termine *performance* associato agli scalpelli di perforazione. Sono descritti, nelle loro linee guida, il costo/metro (*CM*), la Specific Energy (*SE*), il Drilling Index (*DI*) e l'Economic Index (*EI*), il Design Index ed il Directional Difficulty Index (*DDI*).

#### 3.3.1 Il Costo/Metro

In generale, il criterio più diffuso ed utilizzato per confrontare le *performance* dei vari scalpelli è il costo/metro [6,7], che rappresenta il costo unitario di perforazione della battuta, ed è quantificabile mediante la seguente espressione:

$$CM = \frac{R \cdot (d + t) + B}{H} \quad (1)$$

dove *CM*, *R*, *d*, *t*, *B*, *H* rappresentano rispettivamente il costo/metro, la tariffa oraria dell'impianto, il tempo di perforazione, il tempo di manovra, il costo dello scalpello e l'intervallo perforato. Il confronto tra utensili con il metodo del *CM* può essere fatto a consuntivo, confrontando i costi unitari per battuta dei vari scalpelli. L'utensile che ha il *CM* minore è quello che, per questa metodologia, ha ottenuto le *performance* migliori. Utili indicazioni si possono avere anche dai risultati ottenuti nelle prime ore di perforazione: per tale valutazione è utile l'uso di curve che esprimono la relazione tra *H* ed *ROP* che deve esistere per uno scalpello in esame, per ottenere il medesimo *CM* di un secondo utensile preso come riferimento. Data una certa unità litologica omogenea, si calcola, a consuntivo mediante l'eq. (1), il *CM\** ottenuto con uno scalpello di riferimento:

$$CM^* = \frac{R \cdot (d^* + t^*) + B^*}{H^*} \quad (2)$$

dove  $d^*$ ,  $t^*$ ,  $H^*$  sono valori misurati e  $B^*$  è il costo dello scalpello. Per uno scalpello in esame di costo  $B'$ , si fissano alcuni valori  $d'$  (es. 1,2,3 ore). Per ottenere il medesimo costo unitario  $CM^*$ , deve essere verificata la relazione seguente:

$$CM^* \cdot H' = R \cdot (d' + t^*) + B' \quad (3)$$

E' quindi possibile calcolare  $H'$  in base all'eq. (3) ed  $ROP'$  tramite la relazione seguente:

$$ROP' = \frac{H'}{d'} \quad (4)$$

Riportando graficamente la relazione tra  $H^*$  ed  $ROP^*$  per lo scalpello di riferimento si ottiene una curva simile a quella rappresentata nella figura seguente. In generale, più  $H$  aumenta più  $ROP$  diminuisce perché lo scalpello tende ad usurarsi. Se si identificano nel medesimo grafico le coppie di valori  $H'$  (in base ai  $d'$  fissati) ed  $ROP'$  dell'utensile in esame, si possono rappresentare punti a destra ed a sinistra della curva: i primi rappresentano uno scalpello più economico, i secondi uno scalpello meno economico di quello di riferimento. Una volta effettuata la valutazione dell'economicità degli utensili, sarà possibile programmare, per i pozzi vicini, gli scalpelli da utilizzare.

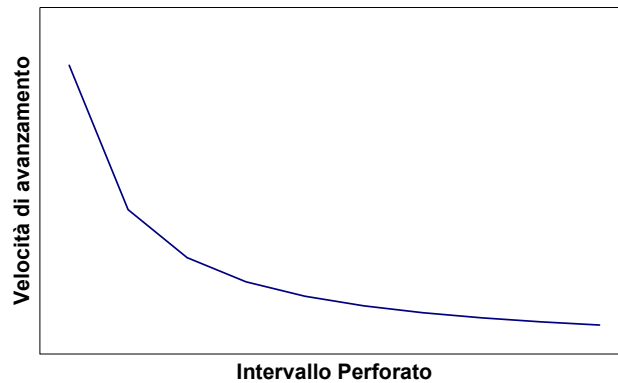


Figura 30: curva che esprime, generalmente, la relazione tra  $H$  ed  $ROP$ .

In caso di formazioni geologiche note ed uniformi, il  $CM$  può essere utilizzato per decidere il momento in cui estrarre lo scalpello, cioè determinare la fine di una battuta. Si costruisce una curva dei costi (Figura 31) monitorando con una frequenza costante il  $CM$ , e, a prescindere dalle ore effettive di perforazione, lo scalpello dovrebbe essere estratto al momento in cui, raggiunto il minimo nella curva dei costi (punto detto di *break-even*), il  $CM$  inizia a risalire (Figura 31).

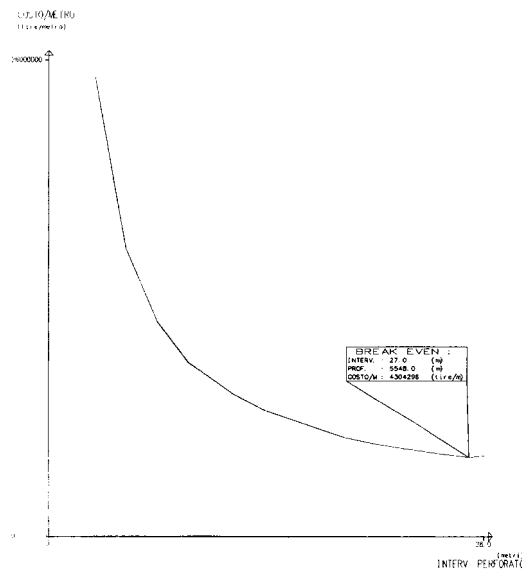


Figura 31: curva dei costi (intervallo perforato – costo/metro) con evidenziato il punto di *break-even* (pozzo Agip, 1994).



La figura seguente illustra un altro metodo per determinare il momento ottimale per estrarre lo scalpello [1], cioè quando la tangente alla curva delle *performance* dello scalpello (*bit performance curve*) è nel punto B, che corrisponde al momento in cui il costo/metro è il più basso ed inizia a crescere.

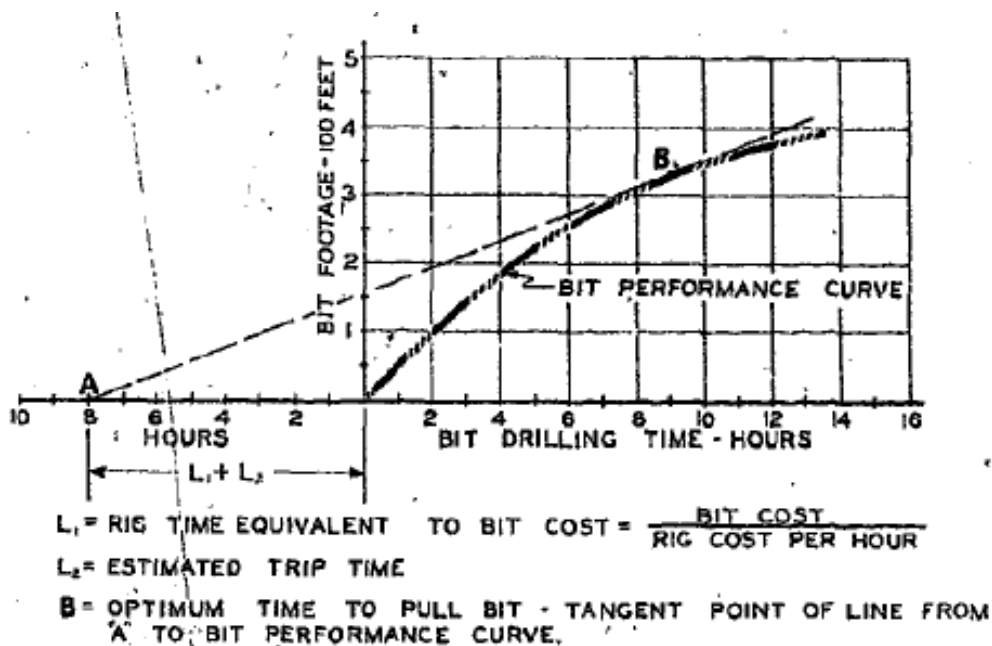


Figura 32: *bit performance curve* [1] con evidenziato il momento migliore per estrarre lo scalpello (punto B).

La valutazione del costo/metro può rappresentare un sistema di riferimento per la valutazione delle *performance* di un dato scalpello, ma il solo calcolo economico non rappresenta generalmente il parametro decisionale per quanto concerne la durata di una data battuta di perforazione.

Il *CM* fornisce informazioni di carattere economico, ha il vantaggio di essere di semplice determinazione, utilizza dati generalmente disponibili in tutti i pozzi e può essere calcolato a consuntivo o durante le operazioni di perforazione. Il suo utilizzo è frequente, anche se rappresenta una stima delle *performance* di uno scalpello che si ritiene valida solo in prima approssimazione [7,8]. L'eq. (1) mostra che il *CM* dipende

da cinque variabili: per ciascun costo dello scalpello ed intervallo perforato, il *CM* è influenzato dalle variazioni del tempo di perforazione, del tempo di manovra e della tariffa di noleggio dell'impianto [8]. Il tempo di manovra non è di facile determinazione, perché dipende da diversi fattori (tra cui il profilo del pozzo e l'impianto): per semplificare i calcoli può essere utilizzato un tempo medio per unità di lunghezza. In una zona perforata con vari impianti e diversi valori della tariffa di noleggio, per ciascuna fase di foro uno stesso scalpello produce differenti valori di *CM*. Anche in questo caso, per semplificare i calcoli, può essere utilizzato un valore medio di *R* in base alla tipologia d'impianto. Si nota, quindi, che il *CM* dipende da fattori che non sono strettamente collegati con le *performance* dell'utensile in pozzo e, in alcuni casi, si utilizzano delle approssimazioni non sempre veritiere.

### 3.3.2 La Specific Energy

La *Specific Energy (SE)*, o energia specifica, è definita come l'energia richiesta per rimuovere un volume unitario di roccia [9, 10]. Tale indice è stato oggetto di vari studi come criterio pratico di selezione degli scalpelli, ed una delle prime espressioni dell'energia specifica è stata la seguente [9]:

$$SE = K_1 \frac{WOB}{\pi \cdot BD^2} + K_2 \frac{RPM \cdot TQ}{BD^2 \cdot ROP} \quad (5)$$

dove *SE* rappresenta l'energia specifica, *WOB* il peso sullo scalpello, *BD* il diametro dell'utensile, *RPM* il numero di giri, *TQ* il momento torcente, *ROP* la velocità di avanzamento e *K<sub>1</sub>* e *K<sub>2</sub>* sono costanti che dipendono dal sistema di misura. L'eq. (5) è formata da due aliquote che, sommate, compongono il lavoro totale compiuto dallo scalpello: la prima è il lavoro compiuto dalla forza assiale (*WOB*) e la seconda è il lavoro compiuto dal momento torcente (*TQ*). Alcuni autori [11] affermano che il contributo del lavoro del *WOB* è comunemente l'1-2% del lavoro compiuto da *TQ*, quindi l'eq. (5) può essere approssimata con la seguente espressione:

$$SE = K_2 \frac{RPM \cdot TQ}{BD^2 \cdot ROP} \quad (6)$$

La misura del momento torcente prodotto allo scalpello non è semplice da effettuare, per questo si cerca di stimarne il valore utilizzando altri parametri più facilmente misurabili [11]. La modellazione matematica della coppia può essere basata su approcci empirici, con l'inevitabile uso di costanti. Un'espressione studiata per gli scalpelli triconici è la seguente [12].

$$TQ = C_1 + C_2 \cdot BD \cdot WOB \cdot \sqrt{\frac{ROP}{RPM \cdot BD}} \cdot \frac{1}{1 + C_3 \cdot L} \quad (7)$$

dove  $L$  rappresenta l'intervallo perforato dallo scalpello,  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  sono costanti di proporzionalità. Altri autori [8, 13] propongono un diverso approccio per determinare un valore del momento torcente, considerando lo scalpello come un'asta rotante con fondo piatto (Figura 33).

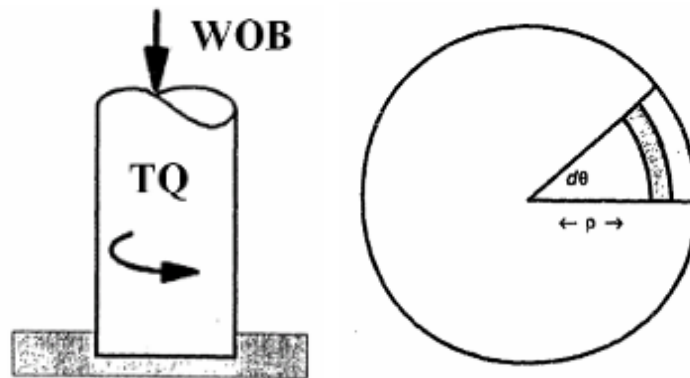


Figura 33: asta circolare a fondo piatto, dove  $WOB$  rappresenta il peso sullo scalpello,  $TQ$  il momento torcente,  $d\theta$  l'ampiezza del settore circolare infinitesimo e  $\rho$  il raggio infinitesimo dell'utensile.

In riferimento alla Figura 33,  $TQ$  si può esprimere nel modo seguente [13]:

$$TQ = \int_0^{\frac{BD}{2}} \int_0^{2\pi} \rho^2 \frac{4 \cdot WOB}{\pi \cdot BD^2} d\rho d\theta = C_4 \cdot BD \cdot WOB \quad (8)$$

dove  $C_4$  rappresenta una costante che dipende dal sistema di misura. Sostituendo l'eq. (8) nell'eq. (6) si ottiene una seconda espressione della *Specific Energy*:

$$SE = K_3 \frac{RPM \cdot WOB}{BD \cdot ROP} \quad (9)$$

dove  $K_3$  è una costante che dipende dal sistema di misura.

Le eq. (5), (6) e (9) della  $SE$  hanno le dimensioni di una pressione.

In base alle equazioni descritte sopra, la *Specific Energy* è calcolabile con i dati normalmente misurati durante le operazioni di perforazione e risulta interessante perché integra i parametri imposti dal perforatore ( $WOB$ ,  $RPM$ ) con quelli ottenuti in base alle scelte effettuate ( $ROP$ ). In base alla metodologia della *Specific Energy*, lo scalpello verso cui indirizzare la propria scelta come *best performer* è quello che, in una data sezione del foro, presenta il minor valore di  $SE$ . In questo modo si identifica lo scalpello che ha esercitato la minore pressione sul fondo del foro, che, in base alla definizione dell'energia specifica, rappresenta anche il *bit* che ha speso minor energia per rimuovere un volume unitario di roccia.

La  $SE$  è calcolata per svariati scalpelli nell'ottava parte della presente relazione e questa metodologia è utilizzata anche nella sesta parte per stimare la perforabilità della formazione.

L'energia specifica è anche usata come indice per rappresentare la difficoltà a perforare una determinata formazione. Un particolare valore dell'energia specifica è il limite tecnico dell'energia specifica meccanica ( $MSE_{TL}$ ) che rappresenta il minor valore di  $SE$  atteso per ciascun ambiente di perforazione. Il limite tecnico della velocità di avanzamento, cioè il massimo valore di  $ROP$  attendibile, è proporzionale a  $MSE_{TL}$  secondo la seguente equazione [14, 15]:

$$ROP_{TL} = K_4 \cdot \frac{WOB}{MSE_{TL} \cdot BD^2} \quad (10)$$

dove  $ROP_{TL}$  rappresenta il limite tecnico della velocità di avanzamento attesa e  $K_4$  è una costante che dipende dal sistema di misura.

### 3.3.3 Il Drilling Index

Il Drilling Index ( $DI$ ) è un indice numerico che può essere associato ad ogni scalpello [16]. Nel modello alla base del metodo  $DI$  sono definiti quattro parametri di caratterizzazione che rappresentano le richieste e/o le aspettative dell'operatore nei confronti dello scalpello utilizzato. Soltanto uno è quantificabile numericamente, mentre gli altri tre sono indicati solo a livello teorico. Questo parametro di caratterizzazione si chiama *bit performance* ( $BP$ ) e rappresenta la capacità dello scalpello di conseguire dei risultati attesi, come la velocità di avanzamento, l'intervallo perforato, l'usura in una data formazione, ed è espresso con la seguente relazione:

$$BP = f(ROP, H, DG) \quad (11)$$

In generale, durante le operazioni di perforazione è possibile individuare due tipi di indicatori, quelli qualitativi e quelli quantitativi. Gli indicatori qualitativi descrivono lo

stato del foro e le caratteristiche geologiche delle formazioni attraversate, quelli quantitativi rappresentano i parametri che possono essere misurati e/o calcolati durante la perforazione [16]. Gli indicatori quantitativi più noti sono: il peso sullo scalpello (*WOB*), la frequenza di rotazione dell'utensile (*RPM*), l'area totale di flusso (*TFA*), la torsione (*TQ*), la portata di fango (*Q*), l'intervallo perforato (*H*), il diametro dello scalpello (*BD*), la resistenza a compressione della roccia (*C<sub>s</sub>*), il peso specifico del fango (*MW*), l'inclinazione e l'azimut del foro ( $\theta$  e  $\varphi$ ), la valutazione dell'usura dello scalpello a fine battuta (*DG*), la velocità di avanzamento (*ROP*), la perdita di carico attraverso le duse ( $\Delta P$ ). Tali indicatori sono delle variabili che possono essere ulteriormente separate in due gruppi: variabili indipendenti e dipendenti. Le variabili indipendenti assumono valori stabiliti entro precisi intervalli operativi, mentre le variabili dipendenti sono determinate attraverso l'applicazione dei parametri indipendenti. *WOB*, *RPM*, *TFA*,  $\Delta P$ , *Q*, *BD*, *MW* sono variabili indipendenti, mentre *ROP*, *TQ*, *H*, *DG*,  $\theta$ ,  $\varphi$  possono essere considerate variabili dipendenti [16]. Al termine della perforazione, data una serie di scalpelli di cui sono noti i valori delle variabili dipendenti ed indipendenti, la valutazione del *DI* è realizzata, attraverso i seguenti passi [16].

Si acquisiscono i valori delle variabili dipendenti ed indipendenti per gli scalpelli di cui si vogliono investigare le *performance*. Tra tutti gli scalpelli in esame, uno è considerato come riferimento (*benchmark*): tutti i calcoli sono riferiti ai valori dei parametri di questo utensile.

Ogni parametro di caratterizzazione è quantificato attraverso la combinazione di variabili indipendenti e dipendenti. Alle variabili dipendenti ed a quelle indipendenti sono assegnati i simboli  $Y_j$  e  $X_i$ , rispettivamente. Ogni variabile dipendente  $Y_j$  è, in seguito, definita come funzione di variabili indipendenti  $X_i$ , tale che il numero di equazioni scritte per ogni variabile dipendente, è uguale al numero di variabili indipendenti:

$$Y_j = f(X_i) \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, m \text{ e } j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

dove  $m$  e  $n$  rappresentano il numero di variabili indipendenti e dipendenti rispettivamente. Il numero totale di equazioni scritto sarà quindi pari a  $mn$ .

Sono assegnate delle costanti  $C_j$  (pesi) a ciascuna delle variabili dipendenti di ogni parametro di caratterizzazione che sta per essere valutato. Le costanti hanno un valore proporzionale all'importanza che l'operatore assegna a ciascuna delle variabili dipendenti dei parametri di caratterizzazione che si vogliono valutare, con il vincolo di continuità:

$$\sum_j C_j = 1 \quad (13)$$

Il calcolo del  $DI$  è valido qualora tutte le funzioni che legano le variabili dipendenti ed indipendenti sono considerate di tipo lineare. Considerando  $K$  una costante di proporzionalità, si ha:

$$Y_j = K \cdot X_i \quad (14)$$

L'equazione che descrive il legame delle variabili dipendenti ed indipendenti, dello scalpello di riferimento è:

$$Y_{jb} = K_{bx} \cdot X_{ib} \quad (15)$$

Il pedice  $b$  rappresenta lo scalpello di riferimento, e la coppia  $bx$  lo scalpello di riferimento e la variabile indipendente che si sta analizzando.

In modo analogo all'eq. (15), si può scrivere un'equazione per lo scalpello di cui si vogliono investigare le *performance*:

$$Y_{jz} = K_{zx} \cdot X_{iz} \quad (16)$$

Il pedice  $z$  rappresenta lo scalpello da investigare, la coppia  $zx$  lo scalpello da investigare e la variabile indipendente che si sta analizzando.

L'equazione descritta precedentemente è riscritta per stabilire la relazione tra le variabili dipendenti dello scalpello da investigare e le variabili indipendenti dello scalpello di riferimento:

$$Y_{zb} = K_{zx} \cdot X_{ib} \quad (17)$$

Il primo membro della coppia  $zb$  esprime lo scalpello in analisi, il secondo membro lo scalpello di riferimento. Questa equazione descrive il comportamento della variabile dipendente dello scalpello di cui si vogliono analizzare le *performance*, in base alla variabile indipendente dello scalpello di riferimento. È bene ricordare che equazioni di questo tipo devono essere scritte per ogni variabile dipendente che si prende in esame.

La costante di proporzionalità  $K_{zx}$  dell'eq. (16) è sostituita nell'equazione precedente, ottenendo:

$$Y_{zb} = \frac{Y_{jz}}{X_{iz}} X_{ib} \quad (18)$$

Tale relazione permette di calcolare il valore relativo alle variabili dipendenti dello scalpello in analisi. Tale operazione è fatta per ogni variabile dipendente ed indipendente dei parametri di caratterizzazione che si vogliono valutare.

Il valore medio relativo a ciascuna variabile dipendente dello scalpello in analisi è calcolato in base alla seguente equazione:



$$Y_{zr} = \frac{\sum Y_{zb}}{m} \quad (19)$$

dove  $Y_{zr}$  rappresenta il valore medio relativo della variabile dipendente dello scalpello da investigare sotto le condizioni dello scalpello di riferimento. Anche questa operazione va fatta per tutte le variabili dipendenti in esame nei parametri di caratterizzazione che si vogliono valutare.

Si assegnano i pesi ad ogni variabile dipendente di ogni parametro di caratterizzazione che si vuole valutare. Questo processo deve essere fatto in accordo con le esigenze e le condizioni della perforazione, ma soprattutto con l'importanza che le variabili dipendenti hanno nel successo tecnico ed economico del programma di perforazione.

I parametri di caratterizzazione che si vogliono valutare sono calcolati con la seguente equazione:

$$D_k = \sum_j C_j \frac{Y_{zr}}{Y_{jb}} \quad (20)$$

dove  $D_k$  rappresenta il parametro di caratterizzazione valutato,  $Y_{zr}$  e  $Y_{jb}$  il valore medio e reale rispettivamente della variabile dipendente dello scalpello di cui si stanno investigando le *performance*.

Un secondo insieme di costanti parametriche  $L_k$  sono assegnate ad ogni parametro di caratterizzazione in accordo con le condizioni di cui ai punti precedenti:

$$\sum_k L_k = 1 \quad \text{per } k=1, 2, \dots, p \quad (21)$$

dove  $p$  rappresenta il numero di parametri di caratterizzazione che si vogliono valutare che, al massimo, assume valore quattro.

Usando il valore  $D_k$  calcolato con l'eq. (20), il  $DI$  è calcolato come segue:

$$DI = \sum_k L_k \cdot D_k \quad (22)$$

Il  $DI$  calcolato con l'eq. (22) è quello dello scalpello di cui si vogliono investigare le *performance* (pedice  $z$ ). Può assumere un valore numerico inferiore o superiore ad 1, cioè al valore che è assegnato allo scalpello di riferimento (pedice  $b$ ). Tra tutti gli scalpelli investigati, quello con il  $DI$  maggiore è quello che ha sembra aver ottenuto le *performance* migliori [16].

La valutazione delle *performance* degli scalpelli di perforazione tramite  $DI$  si sviluppa considerando numerosi parametri di perforazione: alcuni di questi sono decisi dall'operatore durante le operazioni di perforazione, altri derivano da queste scelte ed identificano l'andamento dello scalpello a fondo foro. Elaborando questi parametri, sempre nell'ipotesi di linearità dell'eq. (12), si riesce ad associare un valore numerico allo scalpello. La metodologia del  $DI$  è di tipo comparativo, funziona con i dati di almeno due utensili e genera un valore numerico che è riferito ad 1, cioè il valore del  $DI$  associato allo scalpello scelto come riferimento [16].

Per un gruppo di  $n$  utensili, nell'ipotesi che siano tutti dello stesso tipo con il medesimo diametro e che abbiano perforato la stessa formazione, si riescono a calcolare  $n-1$   $DI$  che si possono riferire al valore 1, associato all'utensile considerato di riferimento.

Tra i quattro parametri di caratterizzazione l'unico quantificabile con i dati che sono generalmente registrati durante la perforazione è  $BP$ . L'assegnazione di costanti parametriche (o pesi) sia alle variabili dipendenti, sia ai parametri di caratterizzazione è, contemporaneamente, un vantaggio ed uno svantaggio di questa metodologia. Affinché il valore del  $DI$  provi a descrivere il comportamento dello scalpello in pozzo, l'assegnazione dei pesi deve essere effettuata in modo rigoroso.

### 3.3.4 L'Economic Index

Unitamente al calcolo del *DI*, può essere valutato anche l'Economic Index (*EI*) [16]. Dato uno scalpello di cui si vogliono investigare le *performance*, considerando il suo costo (*B*) ed il valore del *DI* ad esso associato, viene definito:

$$EI = \frac{B}{DI} \quad (23)$$

I valori dell' *EI* calcolati per gli scalpelli di cui si vogliono investigare le *performance* in termini economici sono riferiti ad 1, cioè il valore dell'*EI* dello scalpello scelto come riferimento [16]. In base all'eq. (23) si può notare che l'*EI* è inversamente proporzionale al *DI*, per cui lo scalpello a cui è associato un valore di *EI* più basso tra tutti quelli selezionati dovrebbe rappresentare quello che ha ottenuto le migliori *performance* in termini economici.

### 3.3.5 Il Design Index

La metodologia del *Design Index* è basata sull'identificazione della configurazione "ideale" dello scalpello, in funzione di determinati parametri e condizioni di perforazione [17]. Il metodo è stato sviluppato per gli scalpelli a taglienti fissi, è applicabile anche agli scalpelli triconici e si tratta di una metodologia sviluppata per valutare le proposte fatte dalle aziende produttrici [17]: la figura seguente ne identifica i passi fondamentali.

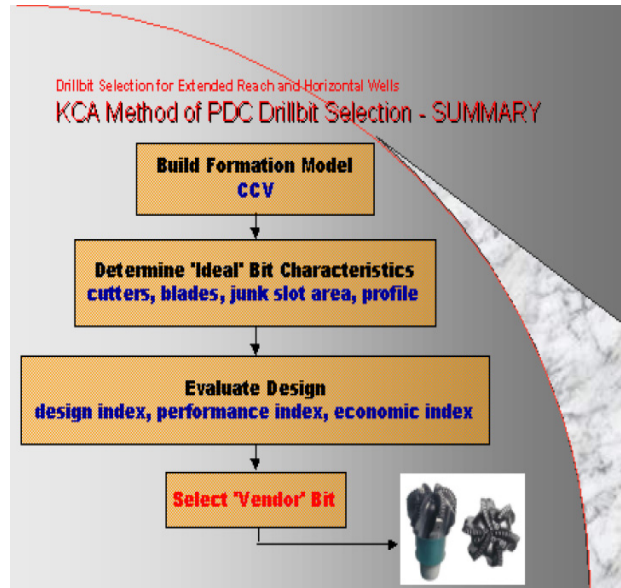


Figura 35: Metodologia del *Design Index* [17]

Utilizzando i dati *mud logging* e *wireline logging* registrati per pozzi di riferimento, si riesce a calcolare la *CCV* (*Confined Compressional Velocity*) che consiste in una misura della resistenza a compressione della roccia per definire il modello della formazione geologica. Per due litologie differenti (A e B), l'equazioni seguenti esprimono *CCV* in funzione della porosità della roccia ( $\Phi$ ), del tempo di transito del *log* sonico nella matrice rocciosa ( $\Delta t_{ma}$ ) e nel fluido intrappolato nei pori ( $\Delta t_f$ ), per azioni di taglio ( $\Delta t_s$ ) e di compressione ( $\Delta t_c$ ), del volume della frazione litologica di cui si desidera misurare la resistenza a compressione ( $V_A$  e  $V_B$ ), dell'abrasività della roccia ( $\alpha$ ) e della profondità reale di perforazione ( $TVD_{top}$ ):

$$CCV = \left[ \frac{TVD_{top}}{5000 \text{ ft}} \right] \cdot \left[ \frac{1}{V_A \cdot \Delta t_{cA} \cdot \left( \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)_A^\alpha \cdot V_B \cdot \Delta t_{cB} \cdot \left( \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)_B^\alpha} \right] \text{ se } TVD_{top} > 2000 \text{ ft} \quad (24)$$

$$CCV = \left[ 1 + \frac{TVD_{top}}{5000 \text{ ft}} \right] \cdot \left[ \frac{1}{V_A \cdot \Delta t_{cA} \cdot \left( \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)_A^\alpha \cdot V_B \cdot \Delta t_{cB} \cdot \left( \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)_B^\alpha} \right] \text{ se } TVD_{top} < 2000 \text{ ft} \quad (25)$$

$$\Delta t_c = \Delta t_{mA} \cdot (1 - \phi) + \Delta t_f(\phi) \quad (26)$$

Il valore di  $CCV$  è utilizzato per determinare alcune caratteristiche che deve possedere l'utensile ideale: la dimensione ed il numero di taglienti, il numero delle lame, la lunghezza del *gauge*, la *junk slot area* e l'angolo di *back rake* [17]. Il numero delle lame e dei taglienti e la dimensione delle lame sono funzioni di  $CCV$  e della profondità, la lunghezza del *gauge* è funzione delle lunghezze massime e minime per quella tipologia di utensile e della profondità, la *junk slot area* è funzione della profondità e di un indice di pulizia del foro e l'angolo di *back rake* è funzione degli angoli massimi e minimi per quella tipologia di utensile e della profondità.

Non sono riportate le equazioni che quantificano le dipendenze espresse sopra perché sono riferite a specifiche formazioni geologiche su cui il modello del Design Index è testato [17].

Sul modello del *Drilling Index* [16] si calcola quindi il *Design Index* come combinazione lineare delle caratteristiche dell'utensile ideale, confrontate poi con quelle di uno scalpello di cui si vogliono investigare le scelte progettuali. Il *Design Index* è calcolato per ogni scalpello riferendolo a quello ideale e come il *DI* si calcola sulla base di uno scalpello di riferimento. Calcolando, per ogni scalpello di cui vogliono investigare le *performance*, il *Design Index* [17], il *Drilling Index* e l'*Economic Index* [16] e sommando i tre indici si ottiene una valutazione complessiva delle *performance* dell'utensile in pozzo.

### 3.4 Recenti approcci alla valutazione delle *performance* degli scalpelli

Negli ultimi anni, i metodi fino ad ora descritti per la valutazione delle *performance* degli scalpelli [1-17] sono stati sostituiti dall'uso di strumenti di calcolo che, tramite l'utilizzo di *database*, cercano d'identificare correlazioni non facilmente riconoscibili tra i parametri registrati in pozzo.

Un primo studio [18] utilizza una composizione di reti neurali per identificare lo scalpello da utilizzare nell'intervallo successivo a quello perforato.

Le reti neurali rappresentano un approccio diverso rispetto a quello analizzato nei paragrafi precedenti e rientrano nel filone dell'intelligenza artificiale strutturale. L'idea di base è di riprodurre l'intelligenza e, in particolare, l'apprendimento simulando all'elaboratore la struttura neurale del cervello animale. L'idea di costruire una macchina intelligente a partire da neuroni artificiali si può fare risalire alla nascita dell'intelligenza artificiale, e già alcuni risultati furono ottenuti da *McCulloch e Pitts* nel 1943 quando nacque il primo modello neurale. Nel 1962 *Rosenblat* propose un nuovo modello di neurone, il "perceptrone", capace di apprendere mediante esempi. Un "perceptrone" descrive il funzionamento di un neurone eseguendo una somma pesata dei suoi ingressi ed emettendo un'uscita "1" se la somma è maggiore di un certo valore di soglia modificabile, o "0" altrimenti. Più recentemente sono state proposte nuove architetture di reti neurali non più soggette alle limitazioni teoriche dei perceptron. Le reti neurali sono più adatte a compiti di classificazione e di percezione concettualmente di basso livello anche se tecnicamente ardui, quali il riconoscimento del parlato, il controllo di processi e il riconoscimento di immagini, mentre problemi concettualmente complessi quali progettazione, diagnosi, pianificazione, rimangono dominio della intelligenza artificiale simbolica.

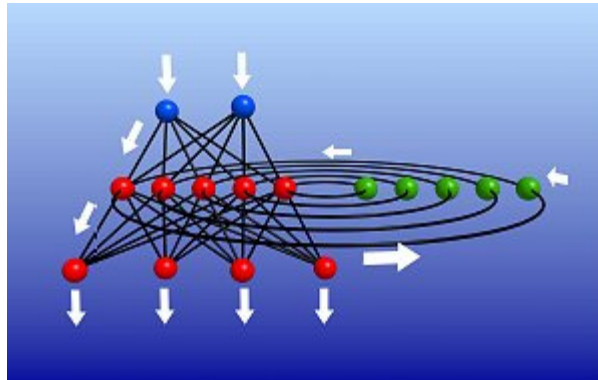


Figura 36: Una rete neurale ricorrente, in cui le connessioni di alcuni neuroni sono in retroazione (<http://www.scienzagiovane.unibo.it/intartificiale/intart-retineuro.html>)

Le reti neurali si basano principalmente sulla simulazione di neuroni artificiali opportunamente collegati. I suddetti neuroni ricevono in ingresso degli stimoli e li elaborano. L'elaborazione può essere anche molto sofisticata ma in un caso semplice si può pensare che i singoli ingressi siano moltiplicati per un opportuno valore detto peso, il risultato delle moltiplicazioni è sommato e se la somma supera una certa soglia il neurone si attiva attivando la sua uscita. Il peso serve a quantificarne l'importanza, un ingresso molto importante avrà un peso elevato, mentre un ingresso poco utile all'elaborazione avrà un peso inferiore. Si può pensare che se due neuroni comunicano fra loro utilizzando maggiormente alcune connessioni allora tali connessioni avranno un peso maggiore.

Normalmente una rete neurale è formata da tre strati. Nel primo abbiamo gli ingressi (*Input*), costituito da tante unità elaborative quante sono le variabili indipendenti del problema da esaminare: questo strato si preoccupa di trattare gli ingressi in modo da adeguarli alle richieste dei neuroni. Il secondo strato è quello nascosto (*Hidden*), ha lo scopo di creare la rappresentazione del problema internamente alla rete, si preoccupa dell'elaborazione vera e propria e può essere composto anche da più colonne di neuroni. Il terzo strato è quello di uscita (*Output*), costituito da tante unità elaborative quante sono le variabili dipendenti che costituiscono la soluzione del problema e si preoccupa di raccogliere i risultati ed adattarli alle richieste del blocco successivo della rete neurale. Poiché non esiste alcuna regola per la determinazione del numero di unità

elaborative che devono comporre tale strato, si procede di solito per tentativi sulla base dell'esperienza. Queste reti possono essere anche molto complesse e coinvolgere migliaia di neuroni e decine di migliaia di connessioni.

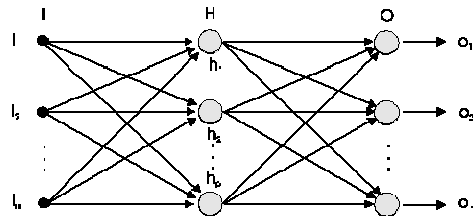


Figura 37: Connessioni in una rete neurale ([http://it.wikipedia.org/wiki/Rete\\_neurale](http://it.wikipedia.org/wiki/Rete_neurale))

La rete neurale utilizzata per la selezione dello scalpello [18] è costituita da due strati nascosti, mentre quella per la valutazione dei costi è composta da tre *Hidden layer*. Il concetto di *multi-layer network* è applicato nello studio di particolari fenomeni, generalmente complessi e non studiabili con un singolo strato nascosto (Figura 45).

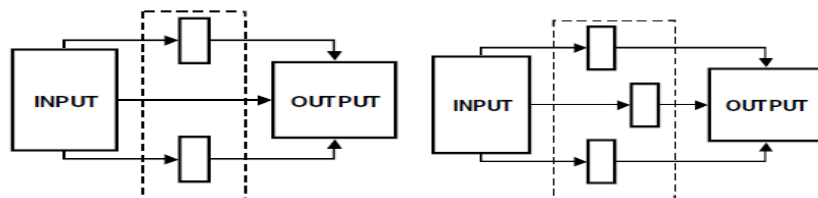


Figura 38: La rete neurale utilizzata per la selezione dello scalpello (sinistra) e quella per la valutazione dei costi (destra).

Per il suo funzionamento, alla rete neurale deve essere “somministrata” una certa quantità di esempi rappresentativi del problema da affrontare, con (reti neurali supervisionate) o senza (reti neurali non supervisionate) le corrispondenti soluzioni. Le reti neurali non supervisionate esaminano gli esempi e creano dei raggruppamenti (*clusters*) in base al reciproco livello di affinità. La rete supervisionata esamina gli



esempi proposti e crea una serie di valori, detti pesi, la cui interazione con le variabili del problema, sulla base di determinate funzioni matematiche, produce delle ipotesi di soluzione; confronta quindi queste soluzioni teoriche con quelle effettive, ne misura lo scostamento e, se tale scostamento supera una soglia massima predefinita, torna indietro, modifica i pesi e ripete il ciclo. In sostanza, procede per approssimazioni successive finché non sono individuate soluzioni accettabilmente simili a quelle reali. Ultimata questa fase, detta di addestramento, si passa a quella di verifica con la somministrazione di alcuni esempi del problema, diversi da quelli già utilizzati, le cui soluzioni, questa volta, non sono comunicate. La rete, sulla base dei pesi elaborati durante l'addestramento, fornisce le proprie soluzioni la cui validità è strettamente dipendente dal livello di efficienza raggiunto. Se l'esito è soddisfacente, la rete è pronta per essere utilizzata nel settore di applicazione per la quale è stata creata, al fine di individuare delle soluzioni non conosciute. Le due reti neurali utilizzate per la selezione dello scalpello [18] usano il 60% dei dati in fase di addestramento ed il resto per la verifica. La funzione principale di queste due reti è quello di individuare lo scalpello da utilizzare in pozzo. I risultati dello studio sono presentati in forma grafica, comparando gli utensili previsti con quelli utilizzati in pozzo, sia per i dati utilizzati in fase di addestramento (*test*) che in fase di verifica (*verification*). Un esempio dei risultati è riportato nella figura seguente.

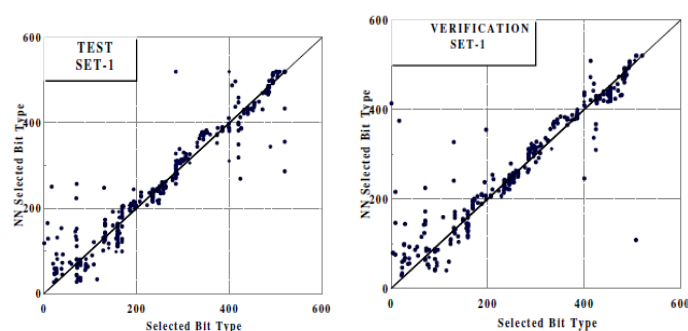


Figura 39: Confronto fra gli scalpelli utilizzati in pozzo e quelli selezionati tramite la rete neurale (*NN*) nella fasi di *test* (sinistra) e di verifica (destra).

La rete neurale è ottimizzata quando i punti dei grafici mostrati nella figura precedente (che rappresentano gli scalpelli) sono allineati sulla bisettrice del quadrante. Per una verifica dell'affidabilità della rete possono essere calcolati alcuni indici come i coefficienti di correlazione e di accuratezza.

## **PARTE IV: L'APPROCCIO DELL'INDUSTRIA ALLA VALUTAZIONE DELLE PERFORMANCE DEGLI SCALPELLI.**

### **4.1 L'approccio delle Compagnie Petroliere**

In questo capitolo sono descritti studi e sistemi utilizzati dalle Compagnie Petroliere e dalle *Service Company* per la valutazione delle *performance* degli scalpelli.

Una prima esperienza consta nella metodologia di lavoro sviluppata da Agip all'inizio degli anni ottanta [19], che consiste nell'utilizzo di un *software* per la raccolta dati ed il calcolo del costo/metro secondo con l'eq. (1).

Con questo sistema si riescono a tracciare curve di costo minimo che permettono di evidenziare scalpelli non adatti alla formazione geologica perforata e/o mal utilizzati.

La prima fase del processo di valutazione delle *performance* degli scalpelli consiste nel realizzare un archivio di dati rilevati in pozzo seguendo le indicazioni contenute in precise istruzioni operative. L'archivio contiene, dettagliatamente, una numerazione progressiva degli scalpelli, le informazioni necessarie per identificare il *bit* (tipo, numero di serie della casa produttrice, ecc.), il costo, il diametro, le profondità di discesa e di estrazione, i tempi di perforazione e di manovra, alcuni dati medi calcolati sulla battuta (es. il peso sullo scalpello, la velocità di rotazione, la portata di fango, ecc.), l'usura dei denti dello scalpello al momento dell'estrazione, la composizione litologica della formazione perforata, informazioni sul fango utilizzato e la composizione della batteria di perforazione.

Costruito l'archivio sono sviluppati i calcoli del costo/metro e del prodotto *RPMWOB*. Raggruppando in un'unica rappresentazione i grafici del costo/metro, del valore *RPMWOB* ed una rappresentazione della composizione litologica del pozzo, si deduce che i valori di costo/metro minori risultano in corrispondenza degli scalpelli più adatti alla formazione perforata e viceversa quelli più alti sono riferiti agli utensili meno adatti.

Utilizzando i dati contenuti nell'archivio di dati descritto sopra, si possono costruire i grafici di *ROP vs. WOB*, *ROP vs. RPM*, *ROP vs. HSI* (potenza idraulica allo scalpello

per unità di superficie), *ROP vs. costo/metro* per valutare l'influenza dei singoli parametri sulla velocità d'avanzamento. Analizzandoli è possibile individuare intervalli ottimali di utilizzo dei parametri *WOB, RPM, HSI*, allo scopo di massimizzare l'*ROP*. Normalmente si nota che un'esasperazione dei parametri di lavoro (ad esempio la perforazione con eccessivo *WOB*) diminuisce le *performance* degli scalpelli.

Il metodo così sviluppato può essere applicato ai pozzi di media e grande profondità, permette di ridurre i tempi quindi i costi di perforazione, sono visibili le differenze di *performance* di scalpelli analoghi prodotti da compagnie diverse, permette di sensibilizzare gli operatori riguardo l'effettivo interesse economico ottenibile da un appropriato impiego degli utensili. I risultati di questo studio possono contribuire in maniera significativa alla programmazione dell'acquisto dei *bit*, evitando giacenze inutili e ritardi nelle spedizioni ai cantieri [19].

Il risultato finale di questo studio consiste nel poter disporre di un primo *database* specifico per gli scalpelli, di una metodologia di lavoro per la valutazione delle *performance* di questi utensili ed infine una serie di valori limite dei parametri *WOB, RPM* e della potenza idraulica allo scalpello (*HHP*) al di là dei quali non conviene spingersi ed al di sotto dei quali non si ottengono le migliori *performance* dall'utensile disceso in pozzo.

A titolo di esempio è riportata l'analisi effettuata con il metodo per la scelta ottimizzata degli scalpelli [19] per il pozzo San Bartolomeo 1. Dall'analisi del diagramma delle *performance* (Figura 39) si nota come per la fase 17-1/2" e quella 12-1/4" si è raggiunto un buon risultato di ottimizzazione. Un'attenta analisi permette di relazionare i picchi dei grafici della figura seguente con condizioni di perforazione definibili anomale, come la presenza di conglomerati (zona A), banchi di arenaria e calcari (punti B) e scalpelli non adatti (punti C).

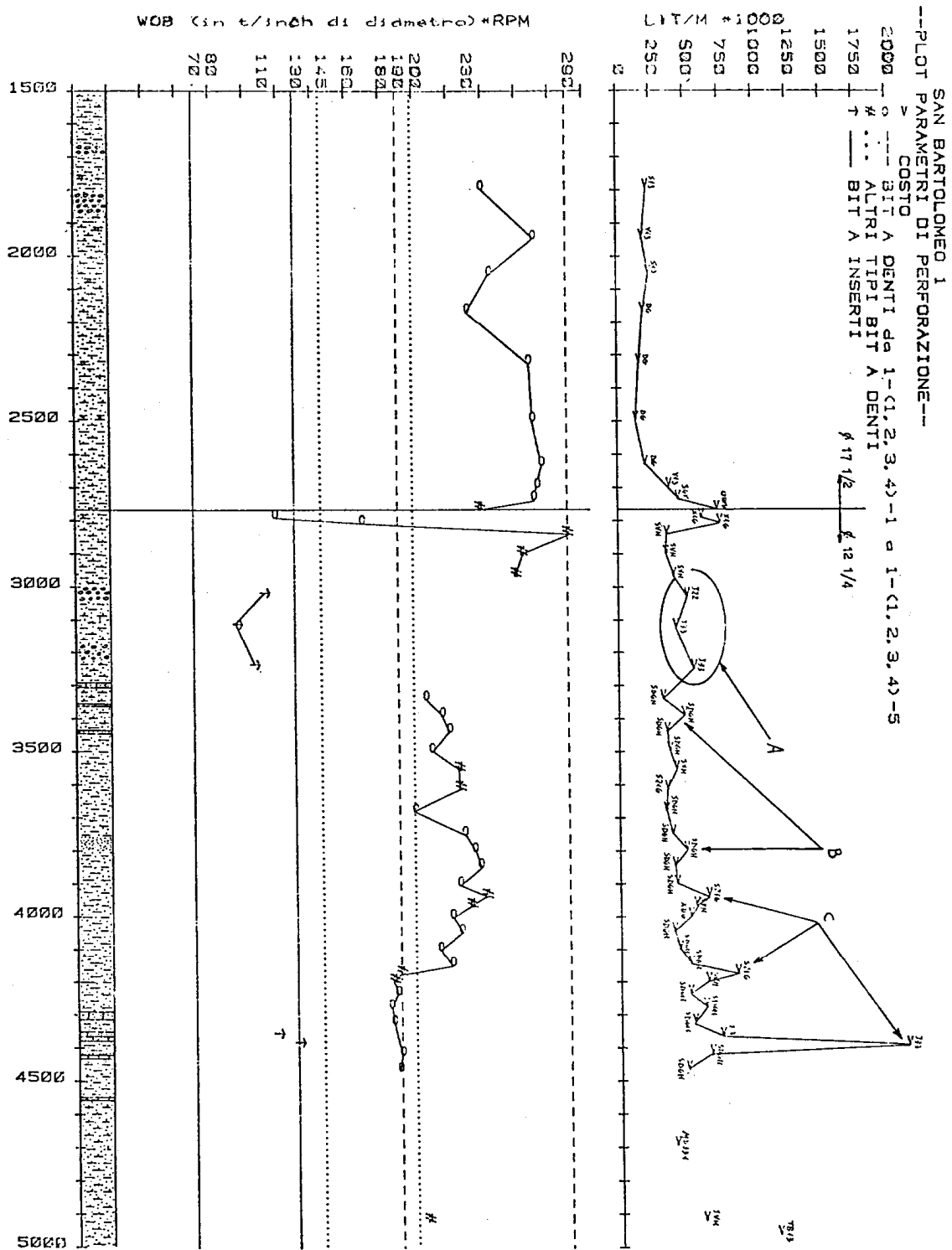


Figura 39: diagramma di *performance* per il pozzo San Bartolomeo 1. Partendo da sinistra: la colonna litologica, i grafici del prodotto *WOBROP* e della portata di fango.

Per quanto riguarda l'analisi dei parametri di peso sullo scalpello, velocità di rotazione e potenza idraulica per l'ottimizzazione della velocità di avanzamento (Figura 40), per la fase 17-1/2" si possono definire ideali i valori di  $WOB = 33 \text{ ton}$ , Velocità di rotazione =  $120 \text{ RPM}$ ,  $HSI = 3 \text{ HHP/in}^2$ . Per la fase 12-1/4" si possono definire ottimali i valori di  $WOB = 25 \text{ ton}$ , Velocità di rotazione =  $110 \text{ RPM}$ ,  $HSI = 5 - 6 \text{ HHP/in}^2$ . Il prodotto  $RPMWOB$  più favorevole risulta essere, per entrambe le fasi, pari ad un valore di circa 230.

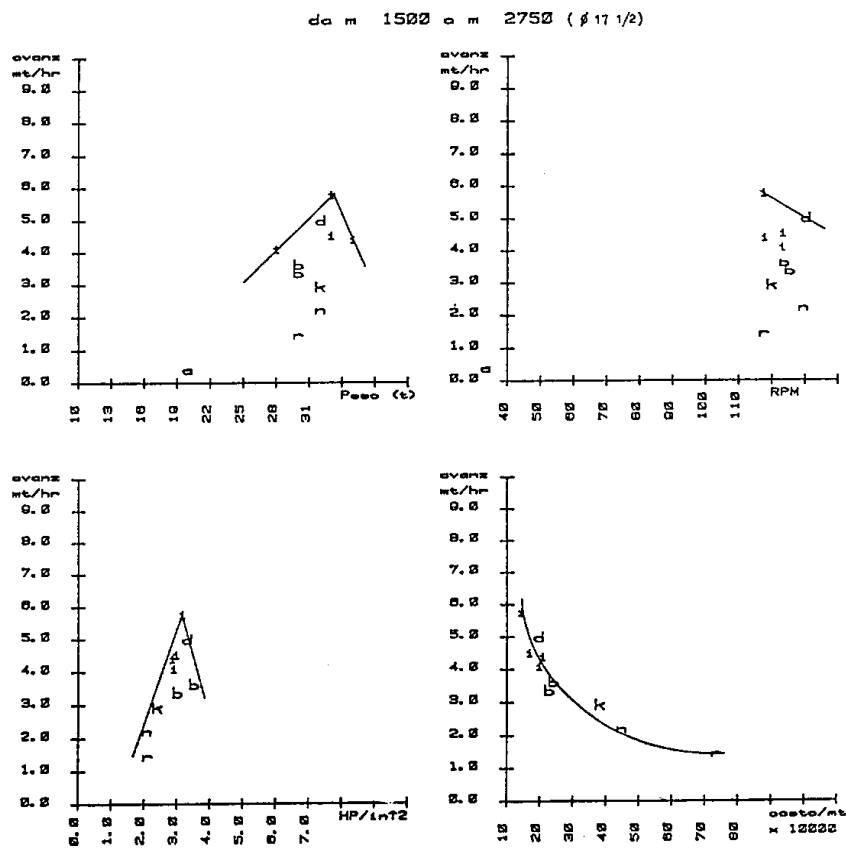


Figura 40: diagrammi utilizzati per l'ottimizzazione della velocità di avanzamento nel pozzo San Bartolomeo 1. Ogni scalpello è identificato con una lettera ed i grafici permettono l'identificazione dei valori ideali di  $WOB$ ,  $RPM$ ,  $HSI$  e costo/metro per l'intervallo da 1500 a 2750 (diametro 17-1/2").

Anche la Compagnia Petrolifera *Chevron*, a metà degli anni ottanta, ha sviluppato una tecnica per definire un accurato programma scalpelli e per ottimizzare le *performance* di perforazione [20] utilizzando le informazioni contenute nei *bit record* e la composizione litologica dei pozzi di riferimento.

In fase di pianificazione di un pozzo, il primo passo per sviluppare un programma scalpelli consiste nella valutazione dei *bit* che sono stati discesi nei pozzi usati come riferimento, in intervalli correlabili con quelli da perforare. Per fare questo anche *Chevron* studia lo scalpello dal punto di vista meccanico, utilizzando il prodotto *WOB RPM*.

In seguito alla determinazione del prodotto *WOB RPM* si determina il valore  $d$ , per avere una valutazione della perforabilità della formazione secondo l'equazione seguente [20]:

$$d = \frac{\log\left(\frac{60 * RPM}{ROP}\right)}{\log\left(\frac{1000 * BD}{12 * WOB}\right)} \quad (27)$$

Il valore di  $d$  permette di ottenere una normalizzazione dell'effetto del peso sullo scalpello e della velocità di rotazione sulla velocità di avanzamento. Correttamente utilizzato,  $d$  permette di stimare la presenza di sabbia nelle formazioni perforate [20].

I due studi descritti precedentemente, sviluppati da *Agip* e *Chevron*, [19, 20] sono molto simili e riguardano la valutazione e l'ottimizzazione della scelta di scalpelli a taglienti mobili.

Un primo studio sulla selezione degli scalpelli *PDC* è stato sviluppato da *Petrobras* all'inizio degli anni novanta [21, 22], considerando un'analisi delle passate *performance* di scalpelli sia a taglienti mobili che a taglienti fissi, utilizzando i valori del *log* sonico, con cui si riesce a valutare la litologia della roccia perforata e si determinano i valori delle resistenze a compressione ed a taglio della roccia [21].

Graficando, in termini di profondità, i suddetti valori di resistenza con il costo/metro degli scalpelli si riescono a valutare le *performance* degli utensili in funzione della roccia che hanno perforato [21] e si riesce a costruire una matrice detta di efficienza dello scalpello (ripresa in parte nello studio del *Drilling Index* [16]) che, per i pozzi considerati come riferimento, identifica le *performance* degli utensili discesi in pozzo, considerando sia i parametri meccanici ed idraulici dello scalpello (es. *WOB*, *RPM*, *ecc.*) che i valori delle resistenze a compressione ed a taglio della roccia.

Altri autori propongono una valutazione delle *performance* degli scalpelli considerando lo stato di *stress* in situ della roccia perforata [23] e si basa sull'utilizzo di un metodo di stima agli elementi finiti della relazione tra un indice di plasticità della roccia (*IP*, non completamente definito) e la velocità di avanzamento sia per scalpelli a taglienti mobili che a taglienti fissi. Il metodo permette di individuare degli intervalli di confidenza dell'indice di correlazione *IP vs ROP* per identificare le *performance* degli utensili discesi in pozzo in funzione della formazione geologica perforata. L'indice di correlazione, calcolato per sei pozzi verticali *offshore*, permette di identificare una distribuzione grafica simile a quella riportata nella figura seguente [23]:

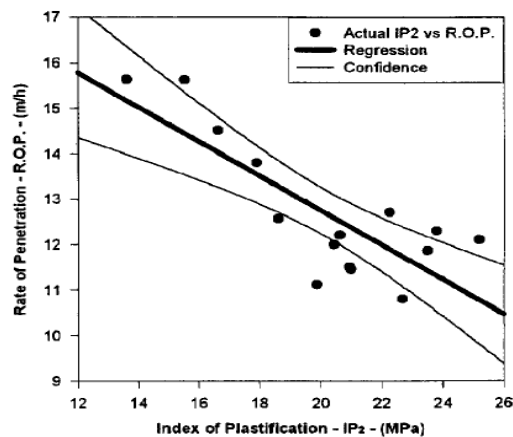


Figura 41: per il pozzo denominato A, identificazione grafica della correlazione tra *IP* ed *ROP*, della linea di regressione e degli intervalli di confidenza [23].



Gli studi descritti fino ad ora sono presenti solo in bibliografia, e non ci sono informazioni su di un loro utilizzo in grande scala. Tra tutti i più interessanti risultano quelli sviluppati da *Agip* e *Chevron* che, anche se sono riferiti ai soli scalpelli a taglienti mobili, implementano interessanti confronti tra costo/metro e parametri di lavoro dello scalpello (*WOB*, *RPM*).

Attualmente, non ci sono informazioni bibliografiche aggiornate sulle tecniche di valutazione delle *performance* degli scalpelli da parte delle Compagnie Petrolifere. In Italia, ciò che Eni S.p.A. divisione E&P produce al termine le attività di perforazione di un pozzo è un rapporto finale (*Final Well Report, FWR*), che consiste in una raccolta dei rapporti giornalieri (*Daily Drilling Report, DDR*), in un'analisi degli scostamenti tra le attività pianificate e quelle realizzate e in una serie di rapporti che riguardano i principali aspetti delle fasi di perforazione, tra cui anche gli scalpelli utilizzati. La figura seguente riporta un estratto del *bit record* dal *FWR* del pozzo Pozzo C Or B, Val d'Agri.

| E&P DIVISION<br>UGIT        |  | BIT RECORD      |              |            |         |           |           |                |     |                         |  | WELL NAME |  |
|-----------------------------|--|-----------------|--------------|------------|---------|-----------|-----------|----------------|-----|-------------------------|--|-----------|--|
| APGI/Inge                   |  | DATE: 24-mar-06 |              | ARPO-05    |         |           |           |                |     | AGRI 1 OR (B)           |  |           |  |
|                             |  |                 |              |            |         |           |           |                |     | FIELD NAME<br>Vulturino |  |           |  |
|                             |  |                 |              |            |         |           |           |                |     | WELL CODE<br>0          |  |           |  |
|                             |  |                 |              |            |         |           |           |                |     | Cost center<br>030A37   |  |           |  |
| Run n°                      | 9  | 10              | 11           | 12         | 13      | 14        | 15        | 16             |     |                         |  |           |  |
| Bit n°                      | 4RR  | 5               | 5RR          | 0          | 7       | 8         | SRR       | 0              |     |                         |  |           |  |
| Bit size [in]               | 8 1/2  | 6               | 6            | 6          | 6       | 6         | 6         | 6              |     |                         |  |           |  |
| Bit manufacturer            | HCC  | HCC             | HCC          | HCC        | HCC     | HCC       | HYC       | HYC            | HCC |                         |  |           |  |
| Bit type                    | MK-C1  | 1HC             | STR          | STX        | STX     | DSX71HGSU | DSX71HGSU | HM352GB        |     |                         |  |           |  |
| Special features codes      |  |                 |              | 305        | 305     |           |           |                |     |                         |  |           |  |
| Serial number               | 6034226  | 6024293         | 6024293      | 7203883    | 7204675 | 105545    | 105545    | 7300526        |     |                         |  |           |  |
| IADC code                   | 117  | 112             | 112          | M443       | M443    | PDC       | PDC       | Impr           |     |                         |  |           |  |
| Depth in [m]                | 2838   | 3475            | 3475         | 3475       | 3895    | 4088      | 4091      | 4408           |     |                         |  |           |  |
| Depth out [m]               | 2838   | 3475            | 3475         | 3895       | 4088    | 4091      | 4408      | 4594           |     |                         |  |           |  |
| Drilled interval [m]        | 0  | 0               | 0            | 420        | 193     | 3         | 317       | 156            |     |                         |  |           |  |
| Rotation hrs                |  |                 |              | 111.3      | 72.0    | 1.5       | 101.3     | 108.0          |     |                         |  |           |  |
| Trp hrs                     |  |                 |              |            |         |           |           |                |     |                         |  |           |  |
| R.O.P. [m/h]                | 0.00   | 0.00            | 0.00         | 3.77       | 2.68    | 2.00      | 3.13      | 1.44           |     |                         |  |           |  |
| Average W.O.B. [l]          |  |                 |              | 0          | 5       | 3         | 0         | 5              |     |                         |  |           |  |
| Average R.P.M.              |  | 30              |              | 250        | 300     | 335       | 350       | 600            |     |                         |  |           |  |
| D.H.M. R.P.M.               |  |                 |              |            |         |           |           |                |     |                         |  |           |  |
| Flow rate [l/min]           |  | 1600            |              | 1200       | 1130    | 1100      | 1050      | 1000           |     |                         |  |           |  |
| St. pipe pressure [kg/cm²]  |  |                 |              | 228        | 250     | 270       | 275       | 280            |     |                         |  |           |  |
| D.H.M. Press. drop [kg/cm²] |  |                 |              |            |         |           |           |                |     |                         |  |           |  |
| Bit HHP                     | 0.0  | 0.0             | 0.0          | 12.6       | 10.6    | 0.0       | 8.5       | 9.8            |     |                         |  |           |  |
| HSI                         | 0.000  | 0.000           | 0.000        | 0.446      | 0.374   | 0.000     | 0.300     | 0.347          |     |                         |  |           |  |
| Annulus min vel. [m/min]    |  |                 |              | 51         | 35      |           | 32        |                |     |                         |  |           |  |
| IERS                        | 1 [102 m]  |                 |              | 18         | 22      | 22        | 22        | 16             |     |                         |  |           |  |
|                             | 2 [102 m]  |                 |              | 16         | 22      | 22        | 22        | 16             |     |                         |  |           |  |
|                             | 3 [102 m]  |                 |              | 16         | 16      | 16        | 16        | 16             |     |                         |  |           |  |
|                             | 4 [102 m]  |                 |              | 18         | 16      | 16        | 16        | 16             |     |                         |  |           |  |
|                             | 5 [102 m]  |                 |              | 18         |         |           |           | 16             |     |                         |  |           |  |
|                             | C [102 m]  |                 |              |            |         |           |           |                |     |                         |  |           |  |
| T.F.A. [m]                  |  |                 |              | 1.138      | 1.135   | 1.135     | 1.135     | 0.962          |     |                         |  |           |  |
| BIT DILL                    | Inner rows [I]                                   |                 |              | 2          | 1       |           | 4         | 1              |     |                         |  |           |  |
|                             | Outer rows [O]                                   |                 |              | 5          | 1       |           | 7         | 1              |     |                         |  |           |  |
|                             | Dull other [D]                                   |                 |              | CT         |         |           | BT        | CT             |     |                         |  |           |  |
|                             | Location [L]                                     |                 |              | T          |         |           | A         | S              |     |                         |  |           |  |
|                             | Bearing/Seats [B]                                |                 |              |            | X       |           | X         | X              |     |                         |  |           |  |
|                             | Gauge 1/10 [G]                                   |                 |              | I          | I       |           | I         | I              |     |                         |  |           |  |
| Other chars [O]             |  |                 |              | BT         | DTF     | RO        | WT        |                |     |                         |  |           |  |
| Reason FOOH [R]             |  |                 |              | BHA        | DTF     | PS        | CF        |                |     |                         |  |           |  |
| Mud type                    |  | FW - PO         | FW - PO      | FW - PO    | FW - PO | FW - PO   | FW - PO   | FW - PO        |     |                         |  |           |  |
| Mud density [kg/l]          |  | 1.17            | 1.17         | 1.13       | 1.13    |           | 1.13      | 1.13           |     |                         |  |           |  |
| Mud visc. [cP]              |  | 16              | 16           | 12         | 13      |           | 18        | 18             |     |                         |  |           |  |
| Mud Y.P. [gr/100 cm²]       |  | 12              | 12           | 15         | 18      |           | 19        | 19             |     |                         |  |           |  |
| Survey depth [m]            |  | 3451            | 3451         | 3860       | 4051    |           | 4375      | 4519           |     |                         |  |           |  |
| Survey incl. [deg]          |  | 76.80           | 76.80        | 91.10      | 88.80   |           | 86.70     | 87.50          |     |                         |  |           |  |
| Bit Cost (€)                |  |                 |              |            | 70      |           | 100       |                |     |                         |  |           |  |
| Lithology                   | Type   |                 |              |            | Calcare |           | Calcare   |                |     |                         |  |           |  |
|                             | %  |                 |              |            | 30      |           | 100       |                |     |                         |  |           |  |
| Family                      | Formation Name                                   |                 |              |            |         |           |           |                |     |                         |  |           |  |
|                             | P (PDC) - T (TSP) - R (Roller) - I (Impregn.)    |                 | R            | R          | P       | P         | P         | P              | I   |                         |  |           |  |
| NOTES                       | Note relative a tipo di PDC o elementi rilevanti |                 | Fresato base |            |         |           |           | Prodotto MWD   |     |                         |  |           |  |
|                             | Perforazione di fase                             |                 |              |            |         |           |           |                |     |                         |  |           |  |
| Currency                    |  |                 |              |            |         |           |           |                |     |                         |  |           |  |
| Pag.                        | 2  | of.             | 4            | Supervisor |         |           |           | Superintendent |     |                         |  |           |  |

Figura 42: Estratto del *bit record* del pozzo Pozzo C Or B, Val d'Agri.

Come si vede nell'esempio della figura precedente, le informazioni riguardo lo scalpello utilizzato sono quantificate come medie sulla battuta e sono evidenziati, in giallo, i parametri ritenuti significativi per la valutazione delle *performance* degli utensili.

La valutazione delle *performance* degli scalpelli non è identificata tramite un indice riassuntivo dei parametri registrati nel bit record, è l'operatore che, prevalentemente tramite la sua esperienza, definisce quale utensile è da prendere come riferimento nella fase di pianificazione di un nuovo pozzo.

Il *FWR* contiene generalmente anche delle analisi di costo dove è presente il calcolo del costo/metro.

Le informazioni contenute nei *bit record* fanno parte della memoria storica dei pozzi perforati: sono utilizzate nella fase di *well planning*, per la redazione della sezione del programma di perforazione che riguarda gli scalpelli.

Come per il rapporto finale di pozzo anche il programma di perforazione è standardizzato nella forma e nei contenuti che, per gli scalpelli da utilizzare, consistono in una rappresentazione schematica tipo quella mostrata nella figura seguente.

#### 4.3.9 ANALISI SCALPELLI

##### Fase 28" per C.P. 24"1/2

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| Tipo:       | IADC Code 1.1.1 - 1.1.5 |
| WOB :       | 3-10 ton                |
| RPM :       | 80-100                  |
| Flow Rate : | 2000 - 3000 lpm         |

##### Fase 22" per Casing 18"5/8

|             |                                 |
|-------------|---------------------------------|
| Tipo:       | IADC Code 1.1.5 - 1.3.5 - 4.1.5 |
| WOB :       | 10-20 ton                       |
| RPM :       | 100-180                         |
| Flow Rate : | 3200 - 4000 lpm                 |

##### Fase 16" per Casing 13"3/8

|             |   |
|-------------|---|
| Tipo:       | IADC Code 4.1.5 - 4.3.5 - 4.4.5 - 5.1.5 |
| WOB :       | 15-30 ton                               |
| RPM :       | 150-250                                 |
| Flow Rate : | 3000 - 4000 lpm                         |

##### Fase 12"1/4 per Casing 9"5/8

|             |   |
|-------------|---|
| Tipo:       | IADC Code 4.1.5 - 4.3.5 - 4.4.5 - 5.1.5 - 5.1.7 - M221 - M323 |
| WOB :       | 15-25 ton ( 5 - 15 ton per i PDC )                            |
| RPM :       | 150-250   |
| Flow Rate : | 2000 - 3200 lpm   |

##### Fase 8"1/2 per eventuale Liner 7"

|             |  |
|-------------|--|
| Tipo:       | IADC Code 1.3.7 - 4.4.7 - 5.1.7 - M442 - M623 - M631 |
| WOB :       | 5-20 ton ( 4 - 8 ton per i PDC )                     |
| RPM :       | 150-500  |
| Flow Rate : | 1500 - 2000 lpm                                      |

Figura 43: estratto del programma di perforazione del pozzo xxx, Val d'Agri.

## 4.2 L'approccio delle Compagnie di Servizio

In fase di analisi delle *performance* di perforazione degli scalpelli, *Hughes Christensen (HCC)*, in Italia, costruisce un *bit record* dov'è possibile identificare la tipologia, il codice *IADC* ed *HCC* dello scalpello, il pozzo dov'è stato disceso, l'obiettivo di perforazione, una sommaria descrizione geologica e litologica della formazione perforata, i parametri idraulici di lavoro dell'utensile, la composizione della batteria (*BHA*), l'*ROP*, l'intervallo perforato e la valutazione dell'usura con la codifica *IADC*.

La valutazione delle *performance* non è identificata con uno specifico indice riassuntivo: chi legge il *bit record* deve relazionare le informazioni contenute in esso.

La figura seguente riporta un esempio di *bit record* dello scalpello a taglienti fissi *HH376* con diametro 8-1/2" disceso nel pozzo Pozzo C nella zona della Val d'Agri in Italia.

A livello internazionale, il gruppo *Oasis* della *Hughes Christensen (HCC, www.hugheschristensen.com)* ha sviluppato il *Drill Bit Advisor (DBA)*, un *software* utilizzabile per la selezione degli scalpelli e l'ottimizzazione delle loro *performance* [24, 25]. L' utilizzo del *DBA* è proposto dalla *Hughes Christensen* come supporto tecnico alle Compagnie Petrolifere in fase di *well planning*.

Il *DBA* è un sistema esperto [24, 25], che parte dall'attribuzione di elementi ritenuti di base (sia per la caratterizzazione della formazione geologica che per quanto riguarda i parametri di Progetto e di utilizzo dello scalpello) per arrivare ad un *output* grafico che indirizza il *Drilling Engineer* verso i migliori scalpelli da utilizzare nelle varie fasi del pozzo (sia *HCC* che di *competitor*, a parità di codice *IADC*).

Il *DBA* è alimentato da attributi, utilizzati per descrivere i vari ambienti di perforazione (es. la composizione litologica delle formazioni geologiche perforate, i valori della resistenza a compressione della roccia ed informazioni tratte dai *log* effettuati in pozzo). In sede di pianificazione di un pozzo, il tecnico della *Hughes Christensen*, richiede ai tecnici della Compagnia Petrolifera la composizione litologica delle formazioni, i valori del *log* sonico e del *gamma ray* per quei pozzi già perforati che ritiene significativi per la zona dove si andrà a realizzare il nuovo intervento.

PERFORMANCE UPDATE

**8 1/2" HH376 'HedgeHog'**  
**INNOVATIVE IMPREGNATED PRODUCT LINE**

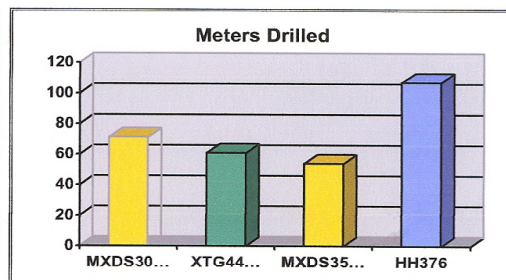
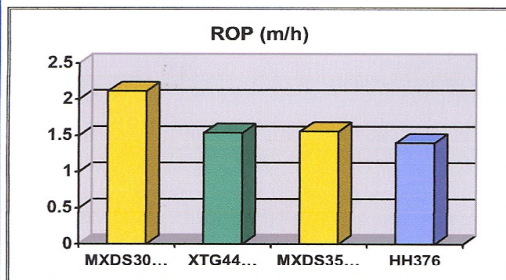
**OBJECTIVE:**

This bit was proposed to drill a vertical section through very hard limestone in AGRI 1, while achieving higher ROP than TCI and competitor Impregnated bits, drilling more and staying in hole longer in order to reduce trips and operating costs.



**Formation:** Piattaforma Apula  
**Lithology:** Very Hard Limestone (UCS 30.000 PSI).  
**Mud:** Fresh Water mud @ 1.20 SG  
**Hydraulics:** 1900 lpm, 280-290 bar, TFA 1.80 in<sup>2</sup>  
**BHA:** Bit, M4XL-P, STAB, MWD, UPU, SHNMDC, SE, PBL, STAB, X/O, 5DC, X/O, JAR, 3DC, X/O, HWDP.

The charts below show a comparison between two TCI rock bits +competitor Impregnated bit run before the **HH376**.



| size | manuf. | type             | IADC | s/n     | out  | drilled | hrs  | ROP  | WOB | RPM  | motor | incl | Dull Grading |    |    |   |    |    |    |  |
|------|--------|------------------|------|---------|------|---------|------|------|-----|------|-------|------|--------------|----|----|---|----|----|----|--|
| 8.5  | HCC    | MX-DS30DX        | 537  | 6008051 | 3500 | 71      | 33.5 | 2.11 | 18  | 110  | 0     | -    | 8            | 8  | BT | E | I  | CD | HR |  |
| 8.5  | SMITH  | XTG44CTPXX       | M842 | JS7130  | 3561 | 61      | 39.5 | 1.54 | 4-8 | 1200 | -     | 5    | 6            | WT | X  | I | NO | PR |    |  |
| 8.5  | HCC    | MX-DS35CGD       | 547  | 6010884 | 3615 | 54      | 34.5 | 1.56 | 18  | 110  | 0     | -    | 2            | 3  | FC | E | I  | ER | HR |  |
| 8.5  | HCC    | HH376 (HedgeHog) | M842 | 7200527 | 3732 | 117     | 83.5 | 1.40 | 4-8 | 910  | 850   | -    | 2            | 2  | BT | X | I  | NO | CP |  |

The **HH 376**, designed for interbedded sandstone/shale, was able to drill almost with the same rate of penetration of TCI rock bits, and two times as much meters through these hard carbonates. This performance demonstrates the higher aggressiveness compared to standard impregnated bits and higher cleaning/cooling capacity.

The **HH 376**, differently from standard impregnated bit, produced quite **undisturbed cuttings** from 1 to 5 mm large, suitable for a good stratigraphy interpretation.

The **HH 376** enabled **AGIP** saving two trips (about **one day** each trip) and about **60 drilling hours** compared to TCI rock bits, while avoiding risks of seal/bearing failure too.

**HUGHES CHRISTENSEN**  
 The Drill Bit Company

Figura 44: valutazione delle performance dello scalpello HH376, pozzo Pozzo C.

L'algoritmo contenuto nel *DBA* (sviluppato dal gruppo *Oasis*) processa i dati in entrata e fornisce graficamente una descrizione, in base profondità, dell'ambiente di perforazione definendo delle zone omogenee a perforabilità presumibilmente costante.

Il risultato del *DBA* è una rappresentazione grafica che identifica il numero di scalpelli consigliati per ogni singola fase, la tipologia e le *feature* che tali utensili devono possedere per essere identificati come accettabili o preferiti e gli eventuali problemi di perforazione che si possono presentare durante il loro utilizzo in quel determinato ambiente di perforazione.

In aggiunta al *DBA*, all'interno dello stesso pacchetto *software*, è possibile ottenere una curva di previsione dell'andamento dell'*ROP* (*Estimated ROP*, *EROP*) [25].

Il *DBA* è stato applicato nell'anno 2006 per identificare il programma scalpelli del pozzo Silvia 1 di Eni S.p.A. Divisione E&P. A titolo indicativo, ma non esaustivo, nella figura successiva è rappresentato il risultato grafico ottenuto con il *DBA* per la fase 14-3/4" del pozzo Silvia 1.

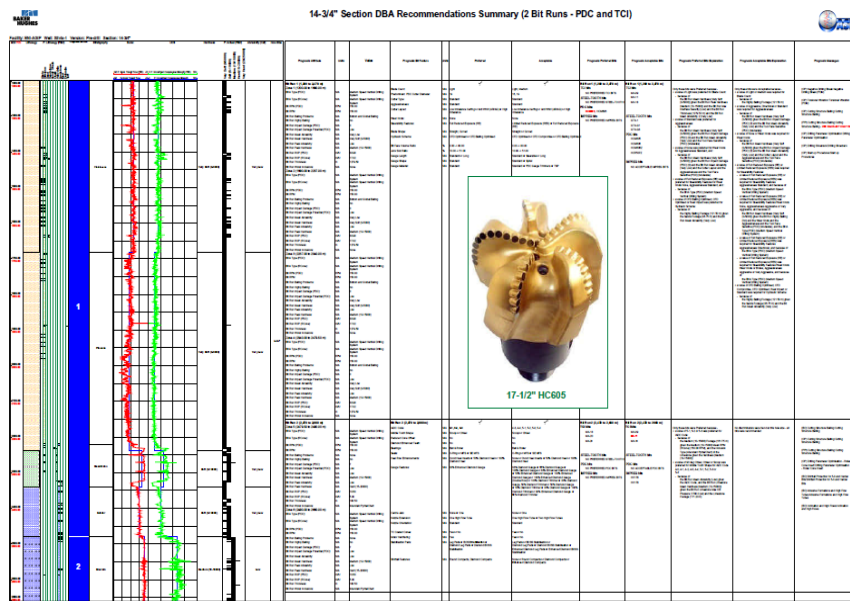


Figura 45: Analisi con il *DBA* per il pozzo Silvia 1, fase 14-3/4". Da sinistra a destra sono rappresentati la litologia del pozzo, il numero delle battute consigliate, gli scalpelli consigliati con le loro *feature*.

Sono ora descritti due sistemi sviluppati ed utilizzati dalla *Smith bits* ([www.smithbits.com](http://www.smithbits.com)) denominati *I-Drill* e *D-Boss* (*Drill Bit Optimization System*: il primo è un modello per la previsione delle *performance* di perforazione, il secondo è un

*software* di analisi per l'ottimizzazione delle *performance* di perforazione degli scalpelli.

*I-Drill* è costituito da un modello che tenta di simulare nel modo più accurato possibile le vibrazioni di tutta la batteria. Il sistema produce risultati sia numerici che grafici, che permettono di identificare le sezioni della *BHA* maggiormente stressate e cerca di identificare la migliore configurazione dello scalpello per ridurre il più possibile le sollecitazioni. Una rappresentazione grafica di un possibile risultato dell'analisi con *I-Drill* è riportato nella figura seguente.

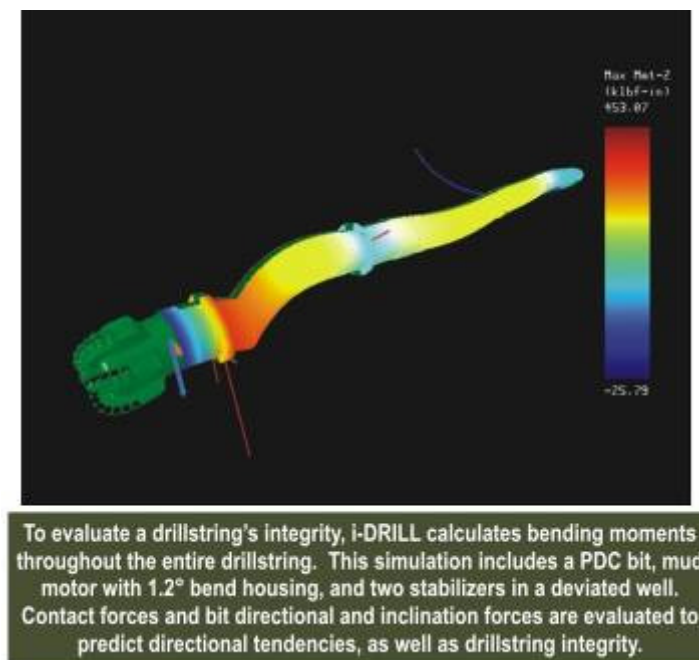


Figura 46: Esempio di studio con *I-Drill*.

Con lo strumento informatico denominato *D-Boss*, *Smith Bits* riesce a determinare una possibile combinazione tra la struttura tagliente, la protezione del *gauge*, la configurazione idraulica e le altre *feature* per l'ottimizzazione delle *performance* di uno scalpello di perforazione. Il documento che *Smith Bits* può fornire in fase di progettazione di un pozzo, è generalmente composto da quattro *plot* essenziali: (1)

Source Data cioè i dati sorgente riferiti alle caratteristiche della formazione geologica da perforare, (2) *Offset Bit Performance Plot* dei parametri degli scalpelli utilizzati nei pozzi di *offset* (es. *WOB*, *RPM*, *ROP*, parametri idraulici, ecc.), (3) e (4) *Rock Bit* e *Fixed Cutter Bit Selector* che identificano la migliore scelta di scalpelli *Smith* in base ai dati contenuti nei plot (1) e (2) in termini di *feature* che l'utensile deve possedere (es. profilo, taglienti, idraulica, ecc.). Un esempio di *plot* (2) e (4) è riportato nelle due figure seguenti.

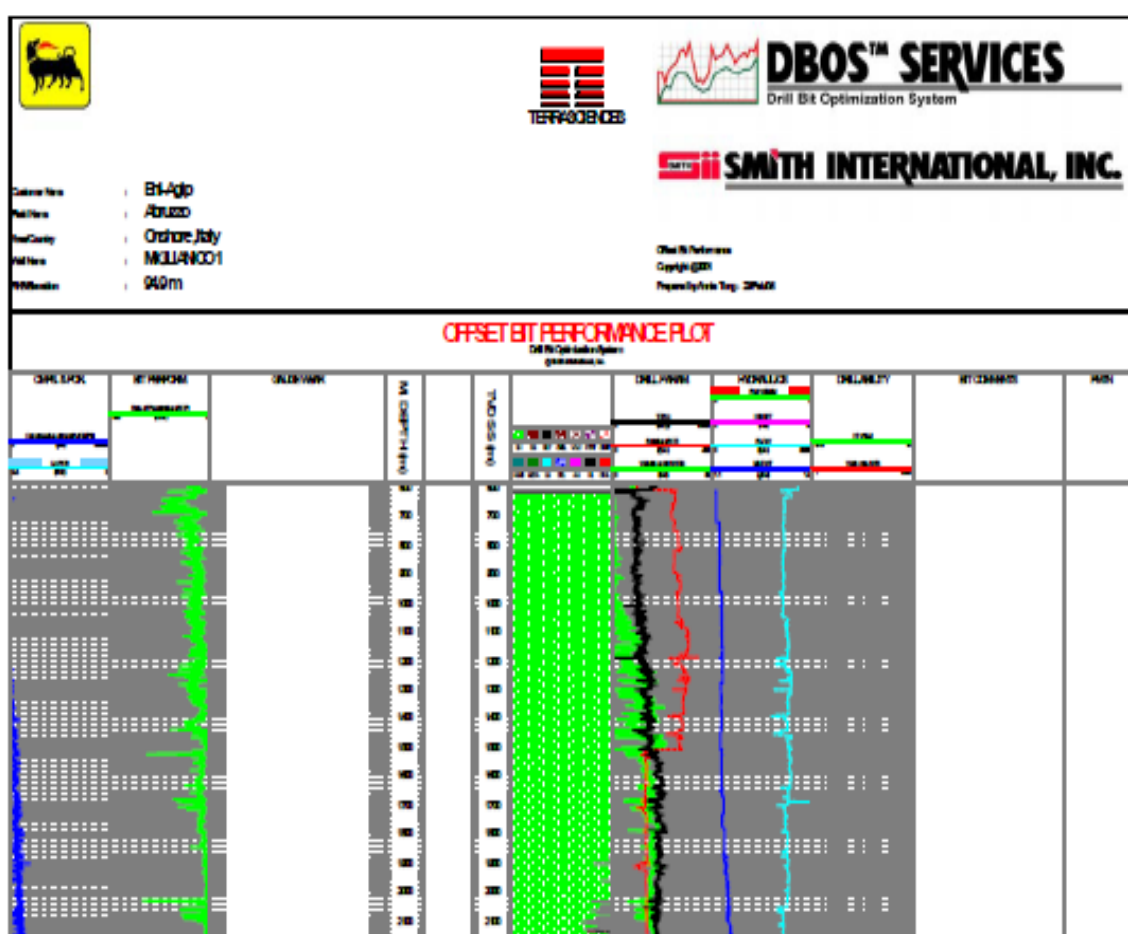


Figura 47: *D-Boss* per il pozzo yyy, *Offset Bit Performance Plot*.

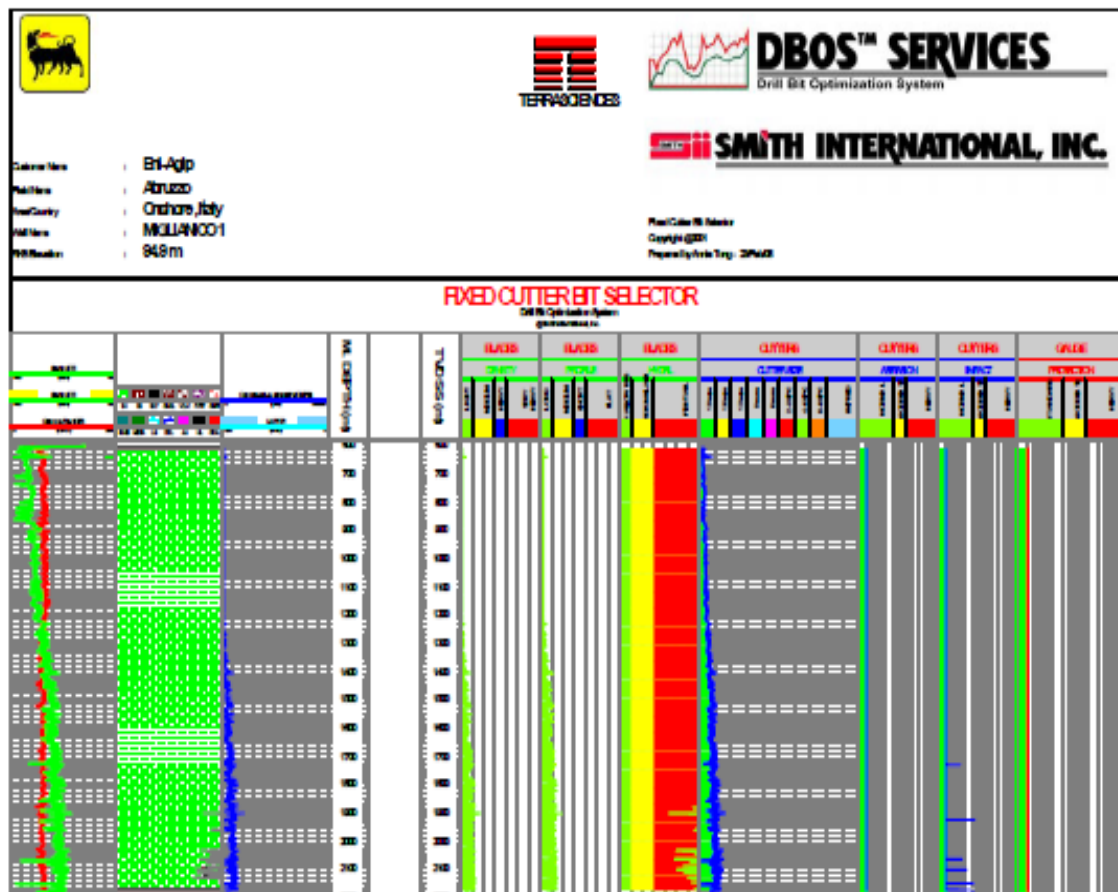


Figura 48: D-Boss per il pozzo yyy, Fixed Cutter Bit Selection

Per un'analisi meno sofisticata del D-Boss, Smith Bits fornisce ai clienti i bit record degli scalpelli che hanno utilizzato. Per ogni scalpello disceso in pozzo la Compagnia di Servizio costruisce un documento molto simile a quello della Hughes Christensen, che comprende: la tipologia, il codice IADC e Smith dello scalpello, il pozzo dov'è stato disceso, l'obiettivo di perforazione, una sommaria descrizione geologica e litologica della formazione perforata, i parametri idraulici di lavoro dell'utensile, l'ROP, l'intervallo perforato e la valutazione dell'usura con la codifica IADC.

Per l'analisi e la valutazione delle performance degli scalpelli Security DBS ([www.halliburton.com](http://www.halliburton.com)) propone il servizio integrato denominato SPARTA (Scientific Planning And Real Time Applications) le cui linee guida sono riportate nella figura seguente.



The SPARTA system is available as a real-time application at the customer office or at a Halliburton facility. Contact your Security DBS representative.

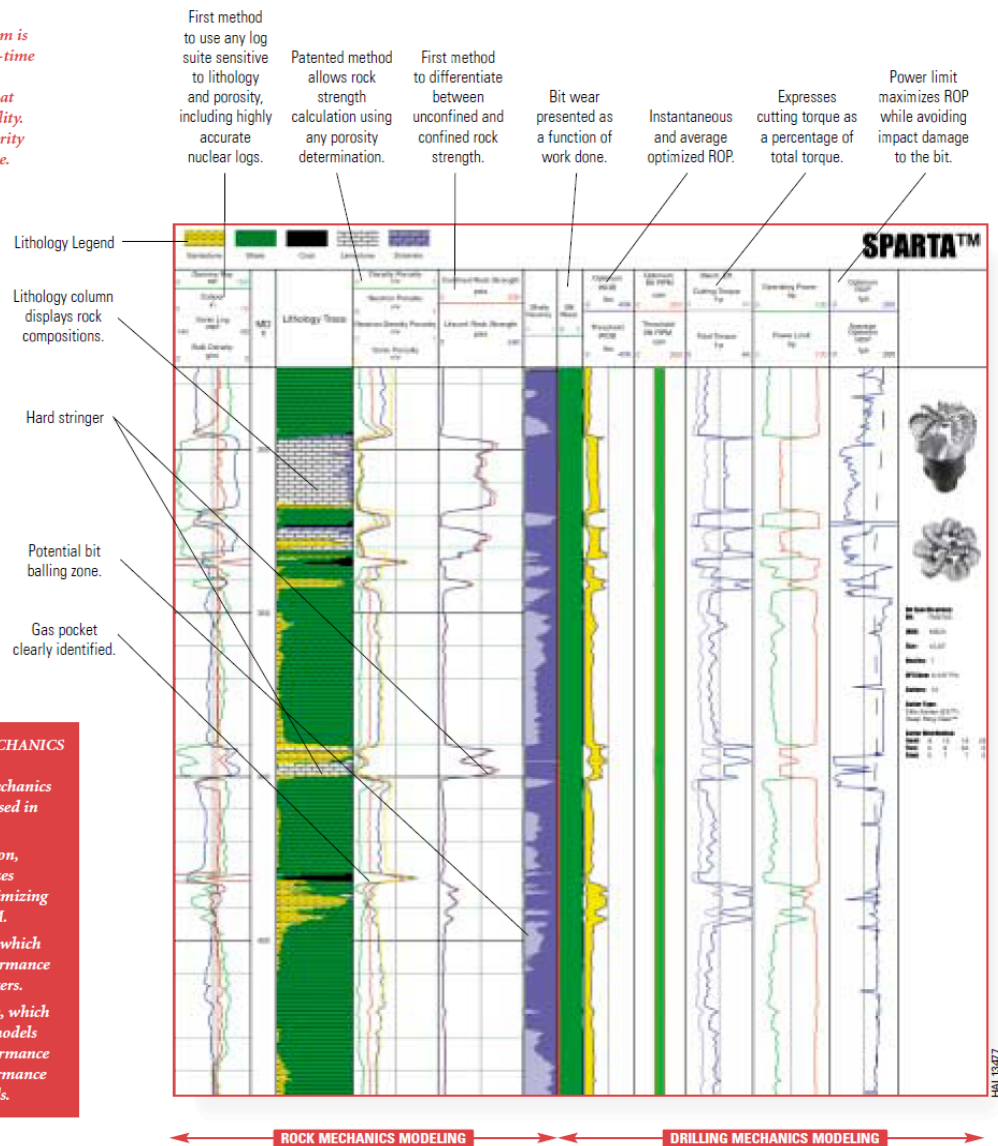


Figura 49: elementi sostanziali del sistema SPARTA.

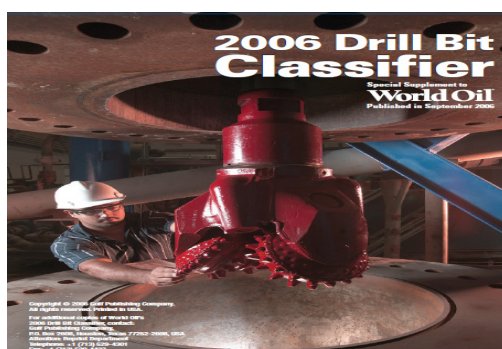
L'approccio di *ReedHycalog* ([www.reedhycalog.com](http://www.reedhycalog.com)) alla valutazione delle performance degli scalpelli è caratterizzato dal recente sviluppo di un modello matematico [26], che considera quattro diversi indici per la valutazione delle performance: velocità di avanzamento, durabilità (cioè come lo scalpello resiste all'usura), stabilità (che indica la resistenza dello scalpello alle vibrazioni laterali),

*sterrabilty* (come reagisce lo scalpello all'applicazione di forze laterali). La valutazione di questi indici è fatta tramite un software denominato *Drilling Model (DM)*, con cui si riesce ad assegnare ad ogni scalpello un punteggio (significativo per la valutazione delle *performance*). Un esempio di risultato è rappresentato figura seguente.



Figura 50: risultati dell'analisi con il *DM*.

Una dettagliata indicazione sugli scalpelli in commercio nel mondo è data dal supplemento alla rivista *World Oil* ([www.worldoil.com](http://www.worldoil.com)) denominato *Drill Bit Classifier*. La pubblicazione è annuale, consiste in una classificazione in funzione dell'azienda produttrice, delle rocce per cui un utensile è più adatto (es. soffici, dure, ecc.), definisce il codice *IADC* ed i valori ottimali di lavoro in termini di *WOB* ed *RPM*. Un esempio (settembre 2006) è riportato nella figura seguente.



| Manufacturer Bit name/model number    | IDOC code | Size range, in.   | Recommended WOB, lb/in. diameter | Recommended rotary speed, rpm | Special features/usage |
|---------------------------------------|-----------|---|----------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| <b>Soft and Soft Sticky</b>           |           |   |                                  |                               |                        |
| <i>Steel toolbit roller cone bits</i> |           |   |                                  |                               |                        |
| <b>Halliburton Security DBS</b>       |           |   |                                  |                               |                        |
| EBKS1                                 | 117       | 6 3/8, 7 1/8  | 1,000-5,000                      | 80-300                        | W                      |
| EBKS3                                 | 137       | 11 1/8  | 2,000-5,000                      | 60-300                        |                        |
| EBKSC1                                | 117       | 6 3/8, 7 1/8, 8 1/8, 9 1/8, 11 1/8, 12 1/8  | 1,000-5,000                      | 80-300                        | W                      |
| EBKSC3                                | 137       | 8 1/2   | 1,000-5,000                      | 80-300                        |                        |
| EBKT1                                 | 115       | 14 1/8, 16, 17 1/2  | 1,000-5,000                      | 80-300                        | G                      |
| EBKT3                                 | 135       | 16, 17 1/2  | 2,000-5,000                      | 60-300                        |                        |
| FEKSC1                                | 117       | 8 1/2   | 1,000-5,000                      | 80-300                        | G                      |
| FXSC1                                 | 117       | 8 1/2   | 1,000-5,000                      | 80-300                        |                        |
| XN1                                   | 111       | 12 1/4, 13 1/8, 14 1/8, 16, 17, 17 1/2, 18 1/2, 20, 22, 23, 24, 26, 28            | 1,000-5,000                      | 80-300                        |                        |
| XN3                                   | 131       | 12 1/4, 22, 26, 28  | 2,000-5,000                      | 60-300                        |                        |
| XN5                                   | 311       | 11 7/8  | 3,000-5,000                      | 40-140                        |                        |
| XS1                                   | 116       | 9 1/8, 12 1/4   | 1,000-5,000                      | 80-300                        |                        |
| XS1                                   | 117       | 4 1/4, 4 3/8, 5 1/8, 6, 6 1/8, 6 3/4, 6 7/8, 8 1/8                                | 1,000-5,000                      | 80-300                        |                        |
| XS3                                   | 137       | 8 1/2, 8 3/4, 11 1/4, 12, 12 1/2  | 2,000-5,000                      | 60-300                        |                        |
| XS4                                   | 216       | 12 1/4  | 2,000-6,000                      | 40-250                        |                        |
| XS4                                   | 217       | 4 1/4, 5 1/8, 6, 6 1/8, 6 3/8, 6 7/8, 8 1/8, 8 3/4, 9 1/8, 10 1/8, 11 1/8, 12 1/4 | 2,000-6,000                      | 40-250                        |                        |
| XSC1                                  | 116       | 9 1/8, 10 1/8   | 1,000-5,000                      | 80-300                        |                        |
| Manufacturer Bit name/model number    | IDOC code | Size range, in.   | Recommended WOB, lb/in. diameter | Recommended rotary speed, rpm | Special features/usage |
| T11                                   | 115M      | 12 1/4, 14 1/4, 16, 17 1/2, 22, 24, 26  | 1,000-3,000                      | 350-60                        | CGMN                   |
| T13                                   | 135M      | 16, 12 1/4, 17 1/2  | 1,000-3,500                      | 350-60                        | SCGMN                  |
| TC10                                  | 117W      | 7 1/4, 8 1/8, 8 3/4   | 1,000-5,000                      | 200-60                        | WG                     |
| TC11                                  | 117W      | 7 1/4, 8 1/8, 9 1/4, 12 1/4   | 1,000-5,000                      | 200-60                        | WG                     |
| TD11                                  | 117W      | 8 1/2, 12 1/4   | 1,000-5,000                      | 200-60                        | SW                     |
| TD13                                  | 137       | 8 1/2   | 1,000-5,000                      | 200-60                        | SD                     |
| Y11                                   | 111       | 12 1/4, 13 1/8, 14 1/8, 17 1/2, 24, 26  | 1,000-3,000                      | 250-60                        | SC                     |
| Y13                                   | 131       | 26  | 1,000-5,000                      | 250-60                        | S                      |
| <b>Smith Tool</b>                     |           |   |                                  |                               |                        |
| DSJ                                   | 131       | 23, 26  | 1,000-4,000                      | 180-70                        | S                      |
| DSJ                                   | 111       | 12 1/4, 13 1/8, 13 1/4, 14 1/8, 17 1/2, 23, 23 1/2, 24, 26, 28                    | 1,000-4,000                      | 180-70                        | S                      |
| FDG                                   | 136       | 5 1/4, 6  | 2,000-5,000                      | 160-50                        | S                      |
| FDGH                                  | 137       | 8 1/2, 11 1/8, 12 1/4   | 2,000-5,000                      | 160-50                        | S                      |
| FDS                                   | 116       | 9 1/8, 11, 12 1/4   | 1,000-5,000                      | 160-50                        | S                      |
| FDS+                                  | 116       | 7 1/4, 8 1/8, 9, 9 1/4, 12 1/4  | 1,000-5,000                      | 160-50                        | S                      |
| FDT                                   | 126       | 7 1/4, 7 1/2  | 1,500-6,000                      | 160-50                        | S                      |
| GGH+                                  | 135       | 16, 17 1/2, 36  | 1,000-5,000                      | 300-50                        | S                      |
| GGH+                                  | 115       | 17 1/2, 18, 18 1/4  | 1,000-4,000                      | 300-51                        | BGHH                   |
| MGDH                                  | 137       | 8 1/2, 8 3/4  | 1,000-5,000                      | 250-50                        | HM                     |
| MGB                                   | 135       | 34  | 1,000-5,000                      | 300-50                        | BGHH                   |
| MGB+                                  | 135       | 12 1/4, 16, 16 1/8, 17 1/2, 24  | 1,000-5,000                      | 300-50                        | BGHH                   |
| MSDGH                                 | 135       | 12, 17, 20, 23, 26, 28  | 1,000-5,000                      | 280-50                        | HM                     |
| MSDGH                                 | 116       | 17  | 1,000-5,000                      | 280-50                        | HM                     |
| Manufacturer Bit name/model number    | IDOC code | Size range, in.   | Recommended WOB, lb/in. diameter | Recommended rotary speed, rpm | Special features/usage |
| <b>Ulterra Drilling</b>               |           |   |                                  |                               |                        |
| SS2LRG                                | 135       | 16, 17 1/2  | 1,000-5,000                      | 350-60                        | CEGHM                  |
| SS1G                                  | 117       | 5 1/8, 6, 6 1/8, 6 3/4, 6 7/8, 8 1/8, 8 3/4, 9 1/8, 9 1/4, 12 1/4                 | 1,000-5,000                      | 350-60                        | CEGHM                  |
| SS1G                                  | 115       | 17 1/2, 20, 22, 24, 26, 32, 36  | 1,000-5,000                      | 350-60                        | CEGHM                  |
| SS1LRG                                | 117       | 4 1/4, 4 3/8, 5 1/8, 6, 6 1/8, 6 3/8, 6 3/4, 7 1/8, 8 1/8, 8 3/4, 8 7/8, 12 1/4   | 1,000-5,000                      | 350-60                        | CEGHM                  |
| SS1LRG                                | 115       | 16, 17 1/2, 20, 22, 24, 26, 32, 36  | 1,000-5,000                      | 350-60                        | CEGHM                  |
| SS2G                                  | 127       | 5 1/8, 6, 6 1/8, 6 3/4, 6 7/8, 8 1/8, 8 3/4, 9 1/8, 9 1/4, 12 1/4                 | 1,000-5,000                      | 350-60                        | CEGHM                  |
| SS2G                                  | 125       | 16, 17 1/2, 20, 22, 24, 26, 32, 36  | 1,000-5,000                      | 350-60                        | CEGHM                  |
| SS2LRG                                | 127       | 5 1/8, 6, 6 1/8, 6 3/4, 6 7/8, 8 1/8, 8 3/4, 9 1/8, 9 1/4, 12 1/4                 | 1,000-5,000                      | 350-60                        | CEGHM                  |
| SS2LRG                                | 125       | 16, 17 1/2, 20, 22, 24, 26, 32, 36  | 1,000-5,000                      | 350-60                        | CEGHM                  |
| <b>Varet</b>                          |           |   |                                  |                               |                        |
| CH1G                                  | 117S      | 6 1/8, 6 3/4, 7 1/4, 8 1/8, 8 3/4, 9 1/8, 11, 11 1/4, 12 1/4, 13 1/8, 13 1/4      | 1,500-5,000                      | 180-80                        | GJMW                   |
| CH2G                                  | 127S      | 7 1/4, 8 1/4  | 2,000-6,000                      | 250-60                        | GMW                    |
| CH3G                                  | 137S      | 8 1/2, 11 1/8, 12 1/4   | 2,000-6,000                      | 180-80                        | GMW                    |

Figura 51: estratto del *Drill Bit Classifier* (settembre 2006).

Per l'analisi delle *performance* degli scalpelli, le Compagnie di Servizio propongono alle *Oil Company* strumenti molto simili tra loro: in fase di *post well analysis* *Smith Bits*, *Hughes Christensen*, *ReedHycalog* e *Security DBS* mettono a disposizione dei clienti i *bit record* degli scalpelli che la Compagnia Petrolifera ha utilizzato in pozzo. Per un'analisi più dettagliata delle *performance*, in fase di *well planning*, le *Service Company* propongono strumenti informatici che generano un programma scalpelli ottimizzato ovviamente legato alle singole esperienze delle Compagnie di Servizio: *Smith Bits*, per esempio, potrà fornire la migliore proposta scalpelli in funzione del suo miglior *bit*, senza considerare le *bit performance* delle altre *Service Company*.

Questa limitazione è superata nel Progetto *Bit Performance* con l'applicazione del *Bit Index* al *Formation Drillability Catalog*, descritto nei capitoli successivi, che permette di valutare le *performance* degli scalpelli indipendentemente dalla casa produttrice.

In base a quanto descritto sopra, i servizi proposti dalle Compagnie di Servizio possono essere utilizzati per una prima valutazione delle *performance* degli scalpelli, che può essere approfondita dall'utilizzo del *Bit Index applicato* al *Formation Drillability Catalog*.

## PARTE V: I MODELLI *BIT INDEX* ED *ECONOMIC INDEX*

### 5.1 Studi sul processo di ottimizzazione della perforazione

In questa sezione della tesi saranno descritte le principali relazioni tra la velocità di avanzamento, i parametri di perforazione e l'usura degli scalpelli. Successivamente, sarà descritta la composizione dei modelli *Bit Index (BI)* ed *Economic Index (EI)*.

La velocità di avanzamento di uno scalpello è generalmente influenzata dalle caratteristiche geologiche, litologiche e geomeccaniche della formazione da perforare, dalla tipologia di *bit*, dal *WOB* e dall'*RPM*, dall'usura, dal fluido di perforazione e dalla potenza idraulica disponibile allo scalpello.

Convenzionalmente, le formazioni geologiche si possono diversificare nelle seguenti classi [27]: *Very Low Strength* (*compressive strenght* < 4000 Pa; argille plastiche e tenere, argilliti tenere, sabbie sciolte e non consolidate), *Low Strength* (4000 Pa < *compressive strenght* < 8000 Pa; argille, argilliti, sabbie argillose, evaporiti tenere, siltiti tenere), *Medium Strength* (8000 Pa < *compressive strenght* < 16000 Pa; conglomerati, calcari sabbiosi o argillosi, marne, arenarie medie o medio-dure, argille dure), *High Strength* (16000 Pa < *compressive strenght* < 32000 Pa; dolomie dure, calcari cristallini, arenarie dure, argilliti dure), *Very High Strength* (*compressive strenght* > 32000 Pa; arenarie fini e siltiti dure, selce, quarziti, rocce ignee e metamorfiche). In generale (si veda anche la seconda parte della presente relazione) uno scalpello a taglienti mobili a denti fresati è ideale per perforare formazioni tenere e poco abrasive, mentre con uno scalpello a taglienti mobili ed inserti in carburo di tungsteno si possono perforare formazioni più dure ed abrasive. Attualmente lo scalpello più versatile tra quelli a taglienti fissi è il *PDC*, utilizzato per perforare formazioni sia tenere che dure. Quando la roccia è estremamente dura ed abrasiva si utilizzano gli scalpelli impregnati. Le suddette considerazioni, scaturiscono principalmente dall'esperienza che le Compagnie produttrici di scalpelli e gli Operatori hanno acquisito negli anni. Attualmente le *Oil Company* possono richiedere alla case produttrici

scalpelli speciali da utilizzare con particolari *feature* che ampliano le classi di utilizzo elencate sopra.

Le proprietà del fluido di perforazione che influenzano la velocità d'avanzamento sono principalmente la densità, le caratteristiche reologiche, il contenuto in solidi e la composizione chimica [27]. La densità, il contenuto in solidi e le caratteristiche di filtrazione del fango controllano la pressione differenziale nella zona di roccia asportata posta sotto il tagliente dello scalpello. La viscosità è un fattore d'influenza dell'*ROP* in quanto, aumentando le perdite di carico nella batteria di perforazione, diminuisce la potenza idraulica disponibile allo scalpello. La velocità d'avanzamento tende a diminuire con l'aumentare della densità, della viscosità e del contenuto in solidi. Le proprietà reologiche influenzano la "pulizia" del foro ed in particolare la rimozione dei *cutting* dalla zona del tagliente. L'effetto principale è comunque quello legato alla densità del fluido di perforazione, ed in particolare alla differenza fra la pressione del fluido di perforazione e la pressione della formazione.

Sia per gli scalpelli a taglienti fissi che per quelli a taglienti mobili, in generale, aumentando il peso e la velocità di rotazione dello scalpello aumenta anche la velocità di avanzamento. A parità di numero di giri, un tipico andamento della relazione fra velocità d'avanzamento ed il peso sullo scalpello è riportato nella figura seguente [28].

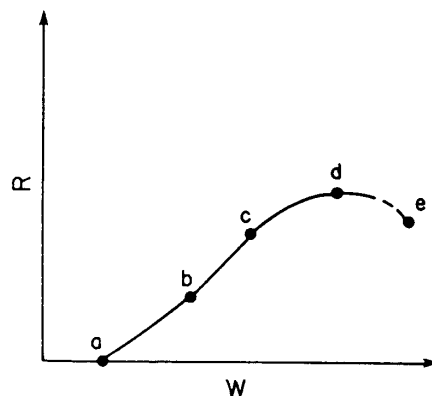


Figura 52: relazione fra velocità di avanzamento ( $R$ ) e peso sullo scalpello ( $W$ ) mantenendo costante la velocità di rotazione dell'utensile.

La legge di variazione è lineare e passante per l'origine nelle rocce più tenere, intersecante l'asse delle ascisse per un certo valore di  $WOB$  nelle rocce più dure, dove nessun avanzamento significativo è ottenuto fino al raggiungimento di un valore di soglia (punto  $a$ ). L' $ROP$  aumenta rapidamente con l'aumentare del peso in modo più o meno lineare (tratti  $ab$  e  $bc$ ). Raggiunto un secondo valore di soglia di  $WOB$  (punto  $c$ ), l'incremento della velocità di avanzamento non è più lineare ed in alcuni casi tende a diminuire: questo fenomeno potrebbe essere collegato ad un'inefficiente "pulizia" del fondo foro in relazione ad un'elevata produzione di *cutting*.

A parità di peso sullo scalpello, un tipico andamento della relazione fra le velocità d'avanzamento e di rotazione dell'utensile è riportato nella figura seguente [28]. Normalmente  $ROP$  aumenta linearmente in funzione di  $RPM$  fino ad un dato valore di soglia (punto  $b$ ): per valori elevati di  $RPM$ ,  $ROP$  tende a diminuire ed anche questo fenomeno può essere attribuito ad una oppure ad un'inefficiente "pulizia" del fondo foro.

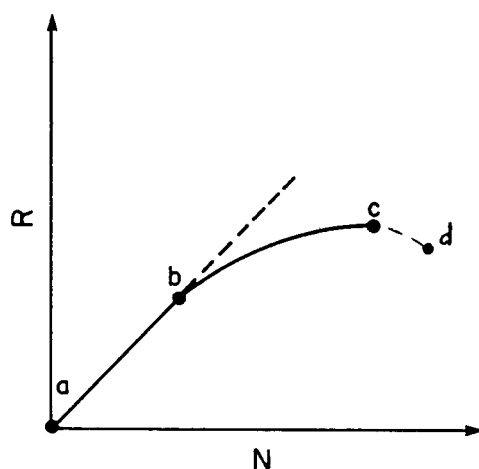


Figura 53: relazione fra le velocità di rotazione ( $N$ ) e di avanzamento ( $R$ ) dell'utensile a parità mantenendo costante il peso sullo scalpello.

Con particolare riferimento agli scalpelli a taglienti mobili, sono stati sviluppati alcuni studi [29-32] che relazionano la velocità di avanzamento con il diametro dell'utensile, il

peso sullo scalpello, la velocità di rotazione e l'usura dei taglienti. In base allo studio condotto da *Galle e Wood* [32], per uno scalpello a taglienti mobili, la velocità di usura di un tagliente dipende generalmente dall'abrasività della formazione, dalla geometria del tagliente, dal peso sullo scalpello, dalla velocità di rotazione e dall'azione di pulizia e raffreddamento del fluido di perforazione. Normalmente la velocità di usura di un tagliente è considerata proporzionale alle ore di rotazione: per quanto riguarda gli scalpelli a denti fresati questa assunzione si avvicina alla realtà, in particolare nel caso in cui l'*hard facing* del dente favorisce una struttura autoaffilante dello stesso. *Galle e Wood* [32] hanno studiato anche l'usura dei cuscinetti, che rappresenta un problema di non facile risoluzione in quanto, nel momento in cui le superfici di un cuscinetto iniziano ad essere danneggiate, la velocità di usura aumenta notevolmente. Le case costruttrici di scalpelli definiscono generalmente la "vita" del cuscinetto in termini di numero totale di rivoluzioni (*total revolution*), nell'ipotesi che i giri applicati sono contenuti in valori tali da prevenire un eccessivo surriscaldamento degli stessi.

Scelto uno scalpello a taglienti mobili e denti fresati, ammessa la perfetta "pulizia" del foro [29], le seguenti equazioni sviluppate da *Galle e Wood* [32], identificano, rispettivamente, la velocità di avanzamento, la velocità con cui si usurano i denti e la velocità con cui si usurano i cuscinetti principalmente in funzione di *WOB* ed *RPM*:

$$\frac{dH}{dT} = c_f \frac{WOB^\beta \cdot RPM^\alpha}{\left( 0,93 \cdot \left( \frac{h_0 - h}{h_0} \right)^2 + 6 \cdot \left( \frac{h_0 - h}{h_0} \right) + 1 \right)^p} \quad (28)$$

$$\frac{d\left( \frac{h_0 - h}{h_0} \right)}{dT} = \frac{1}{A_f} \cdot \frac{RPM^2 + 4,35E^{-5} \cdot RPM^4}{0,93 \cdot \left( \frac{h_0 - h}{h_0} \right)^2 + 6 \cdot \left( \frac{h_0 - h}{h_0} \right) + 1} \cdot \frac{1}{WOB \cdot (1359 - 714,2 \cdot \log(WOB))} \quad (29)$$

$$T_0 = S \cdot \frac{f(WOB)}{RPM} \quad (30)$$

dove, oltre ai simboli già noti,  $H$  rappresenta la lunghezza perforata,  $T$  il tempo,  $c_f$ ,  $A_f$  ed  $S$  tre costanti che dipendono dall'utensile, dal fango e dalla formazione,  $\beta$  una costante il cui valore varia da 0,5 (per le rocce dure) e 1,5 (per le rocce tenere),  $\alpha$  una costante il cui valore varia da 0,4 (per le rocce dure) e 0,8 (per le rocce tenere),  $p$  una costante pari ad 1 per i denti fresasti normali e 0,5 per quelli autoaffilanti,  $h_o$  l'altezza del dente nuovo,  $h$  l'altezza del dente usurato e  $T_0$  il tempo con cui si raggiunge l'usura completa dei cuscinetti.

L'influenza dell'idraulica sulla velocità di avanzamento è studiata utilizzando l'idraulica disponibile allo scalpello ( $HHP$ ) o la forza d'impatto del getto ( $IF$ ). Un'espressione del valore di  $HHP$  [W] è la seguente:

$$HHP = \Delta P_{bit} \cdot Q \quad (31)$$

dove  $Q$  rappresenta la portata di fango,  $\Delta P_{bit}$  [Pa] la perdita di carico attraverso le duse dello scalpello che può essere espressa con la seguente equazione [33]:

$$\Delta P_{bit} = \frac{MW \cdot Q^2}{TFA^2} \quad (32)$$

dove  $MW$  rappresenta la densità del fango e  $TFA$  l'area totale di flusso delle duse dello scalpello.



Il parametro  $IF$  [N] è funzione della portata di fango, della perdita di carico attraverso le dusi dello scalpello, della densità del fango e può essere espresso secondo la seguente equazione [33]:

$$IF = Q \cdot \sqrt{MW \cdot \Delta P_{bit}} \quad (33)$$

Sono stati sviluppati studi sperimentali per scalpelli a taglienti mobili: l'influenza di  $HHP$  ed  $IF$  sull' $ROP$  è riportata nella figura seguente.

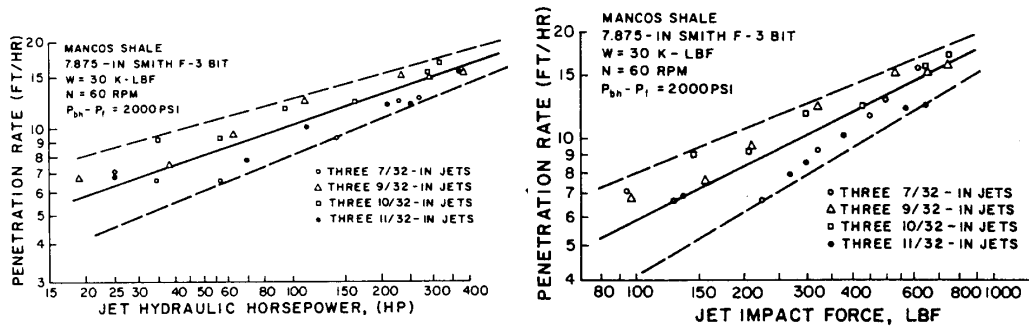


Figura 54: relazione fra velocità di avanzamento ( $R$ ) ed i parametri idraulici  $HHP$  (sinistra) ed  $IF$  (destra) per scalpelli a taglienti mobili.

Dalla figura precedente si nota come  $HHP$  ed  $IF$  influenzano in modo simile la velocità di avanzamento.

## 5.2 Il *Bit Index* e l'*Economic Index*

Il Progetto di ricerca *Bit Performance* prevede la creazione di un modello matematico che implementi l'utilizzo di due indici, il primo denominato *Bit Index* ( $BI$ ) e l'altro chiamato *Economic Index* ( $EI$ ), che permettano di quantificare e valutare il più oggettivamente possibile le *performance* di uno scalpello. Con il *Bit Index* si

quantificano le *performance* dello scalpello riferite prevalentemente alla meccanica di perforazione, al contributo dell'idraulica ed alle caratteristiche della roccia perforata, con l'*Economic Index* si misurano le *performance* considerandone i costi.

Questa prima parte del paragrafo consiste nella descrizione della metodologia di sviluppo del *Bit Index*, mentre l'*Economic Index* è descritto nella parte finale.

Tra gli indici che sono stati descritti nella terza parte della presente relazione, ai fini del Progetto *Bit Performance* risulta interessante il *Drilling Index* [16], in quanto permette di assegnare ad ogni *bit* un valore numerico che ne identifica le *performance* considerando un *set* di parametri più ampio rispetto al costo/metro ed alla *Specific Energy*.

Il gruppo di lavoro del Progetto *Bit Performance* ha deciso di sviluppare un modello matematico denominato *Bit Index (BI)* che, sulla base del *Drilling Index*, presenti le seguenti caratteristiche: (1) sia applicabile ad un *database*, (2) deve considerare gli elementi descrittivi dell'azione meccanica dello scalpello, i parametri idraulici, indicazioni riguardo la formazione geologica ed i costi (3) deve essere composto da informazioni generalmente misurate durante le operazioni di perforazione di Eni S.p.A. Div. E&P in Italia ed all'estero; (4) deve essere flessibile, cioè si deve poter escludere temporaneamente e/o definitivamente dalla valutazione delle *performance* i parametri che l'utente non considera significativi.

Come primo passo si è definita l'eq. (34), detta delle *performance* [16, 35], che relaziona il *BI* con i seguenti indicatori: peso sullo scalpello, velocità di rotazione dell'utensile, portata di fango, potenza idraulica disponibile allo scalpello, velocità di avanzamento, coppia (torsione), intervallo perforato ed usura dell'utensile.

$$BI = f(WOB, RPM, Q, HHP, ROP, TQ, H, DG) \quad (34)$$

Gli indicatori elencati nell'equazione precedente sono delle variabili che possono essere separate in indipendenti e dipendenti: le prime assumono valori stabiliti entro precisi

intervalli operativi ed il loro valore è deciso durante le operazioni di perforazione, le seconde sono determinate attraverso l'applicazione dei parametri indipendenti e consistono in una sorta di "risultato" delle scelte effettuate. In questa ottica, *WOB*, *RPM*, *HHP*, *Q*, sono le variabili indipendenti, *ROP*, *TQ*, *H*, *DG*, sono le variabili dipendenti. La scelta è ricaduta su queste variabili, in quanto sono generalmente misurate da tutti durante le operazioni di perforazione di Eni S.p.A. Div. E&P in Italia ed all'estero e gli studi condotti da svariati autori [27-33] considerano prevalentemente questo sottoinsieme dei parametri come particolarmente significativi per la valutazione delle *performance* degli scalpelli. Tra i parametri significativi è stata anche considerata una valutazione dell'usura dello scalpello [16].

Al termine della perforazione, data una serie di scalpelli di cui sono noti i valori delle variabili dipendenti ed indipendenti, la valutazione del *BI* è realizzata, attraverso i seguenti passi [35]: si acquisiscono i valori delle variabili (*WOB*, *RPM*, *ROP*, *ecc.*) per gli scalpelli di cui si vogliono investigare le *performance*; si calcolano il valore di *HHP* con l'eq. (31), ed il valore di *DG* per mezzo dell'espressione seguente:

$$DG = 0,75 \cdot DG_1 + 0,5 \cdot DG_2 \quad (35)$$

dove  $DG_1$  e  $DG_2$  rappresentano le prime due valutazioni numeriche che esprimono l'usura degli scalpelli secondo la codifica *IADC* riportata nel *bit record*. Tra tutti gli scalpelli in esame, uno è considerato come *benchmark*. Il *BI* è quantificato attraverso la combinazione lineare tra le variabili indipendenti ( $X_i$ ) e quelle dipendenti ( $Y_j$ ), come un'approssimazione dell'eq. (12) [16]. Il calcolo del *BI* è valido qualora tutte le funzioni che legano le variabili dipendenti ed indipendenti sono considerate di tipo lineare. Ad ogni variabile dipendente è assegnato un peso  $C_j$ . Nel processo di valutazione delle *performance* dello scalpello i pesi hanno un valore proporzionale all'importanza che l'operatore assegna a ciascuna delle variabili dipendenti. La somma delle costanti parametriche deve essere pari ad uno. Considerati più scalpelli della stessa tipologia (a taglienti fissi o mobili), con uguale diametro e che abbiano perforato la stessa

formazione geologica, identificatone uno come riferimento (pedice  $b$ ), il valore del  $BI$  degli utensili di cui si vogliono investigare le *performance* (pedice  $z$ ) è calcolato con l'equazione seguente:

$$BI_z = \frac{1}{3} \left( \frac{WOB_b}{WOB_z} + \frac{RPM_b}{RPM_z} + \frac{HHP_b}{HHP_z} \right) \left( \frac{ROP_z}{ROP_b} C_{ROP} + \frac{TQ_b}{TQ_z} C_{TQ} + \frac{H_z}{H_b} C_H + \frac{DG_b}{DG_z} C_{DG} \right) \quad (36)$$

La metodologia del  $BI$  è di tipo comparativo, cioè confronta i valori numerici dei parametri di almeno due utensili e genera un indice che è riferito ad 1, cioè il valore del  $BI$  associato allo scalpello di riferimento [16, 35-42]. Tra tutti gli scalpelli investigati, quello con il  $BI$  maggiore è quello che, per questa metodologia, ha ottenuto le migliori *performance*.

Se uno scalpello ha perforato  $l$  formazioni geologiche (pedice  $k$ , con  $k=1, \dots, l$ ) di cui è possibile valutare la perforabilità ( $\sigma$ ), il valore del  $BI$  associato allo scalpello ( $BI_T$ ) è valutabile con la seguente equazione [39-42]:

$$BI_T = \frac{\sum_{k=1}^l (BI_z)_k \cdot \sigma_k}{\sum_{k=1}^l \sigma_k} \quad (37)$$

In base all'equazioni precedenti è possibile associare ad ogni scalpello un indice che ne identifica le *performance*.

Il  $BI$  è costruito con la possibilità di poter escludere dalla valutazione una o più variabili, ponendo uguale a zero il peso della variabile dipendente che non si ritiene significativo nella valutazione delle *performance* o escludendo la variabile indipendente che non interessa.

Parimenti il *BI* prevede la possibilità d'inserire ulteriori variabili sia indipendenti che dipendenti, adattando l'eq. (47) alle nuove esigenze di valutazione delle *performance* degli scalpelli.

Unitamente al calcolo del *BI*, può essere valutato anche l'*Economic Index* [16]. Dato uno scalpello di cui si vogliono investigare le *performance*, considerando il suo costo ( $B_z$ ) ed il valore del  $BI_z$  ad esso associato, il gruppo di lavoro del Progetto di ricerca *Bit Performance* ha deciso di adottare come espressione dell'indice economico  $EI_z$  la seguente equazione:

$$EI_z = \frac{B_z}{BI_z} \quad (38)$$

In base all'equazione precedente si può notare che il *BI* è inversamente proporzionale all'*EI*, per cui lo scalpello a cui è associato un valore di *EI* più basso tra tutti quelli selezionati dovrebbe rappresentare quello che ha ottenuto le migliori *performance*.

## PARTE VI: IL *FORMATION DRILLABILITY CATALOG*

### 6.1 Indagini sull'utilizzo del *FDC* all'interno del progetto *Bit Performance*

In questo capitolo sarà descritto l'utilizzo del *Formation Drillability Catalog (FDC)* all'interno del Progetto di ricerca *Bit Performance*.

Agli inizi dell'esplorazione petrolifera, durante l'esecuzione di un sondaggio, le valutazioni inerenti la litologia e la presenza di idrocarburi avevano un carattere pionieristico. Sia nella perforazione a percussione sia in quella *rotary*, il campionamento litologico e dei fluidi era ritenuto pericoloso ai fini della sicurezza: le uniche descrizioni dei geologi erano pertanto basate sulla presenza di odore di petrolio o di bolle di gas nel fango di perforazione.

Oggi, grazie all'avvento di tecnologie sempre più sofisticate, il cantiere costituisce un vero e proprio centro di raccolta continua di dati e di controllo delle attività: l'acquisizione e l'analisi dei dati diventano, quindi, momenti importanti e cruciali.

Il processo di ottimizzazione della perforazione, basandosi sull'integrazione di tutti gli operatori interessati alla realizzazione del pozzo e sull'analisi e sulla comparazione di tutti i dati acquisiti, pone l'attenzione sul potenziale valore dei dati, di gran lunga superiore al semplice costo della loro acquisizione.

L'obiettivo dunque è rendere i dati vivi.

In base alle suddette considerazioni nasce il *Formation Drillability Catalog (FDC)*, un catalogo sviluppato a partire dal 1999 dall'unità di Geologia Operativa (G.E.O.P.) di Eni S.p.A. Div. E&P, che attualmente rappresenta una collezione di circa 300.000 dati riferiti a più di 80 formazioni di pozzi perforati in Italia ed all'estero [43].

In questo primo paragrafo sono descritte le caratteristiche fondamentali del *FDC*, differente per contenuto dal *database FDC* descritto alla fine del presente capitolo ma uguale nei concetti fondamentali (es. il *minimum interval*).

Il *FDC* è compilato solo con informazioni considerate significative per la "caratterizzazione geotecnica" della formazione attraversata [43].

La costruzione della suddivisione geotecnica/geomeccanica delle formazioni si basa sui dati di pozzo desunti generalmente dal *Master Log* e dal Profilo 1:1000.

Il *Master log* è uno dei documenti riassuntivi più importanti redatti dalla Compagnia di *Mud Logging*. Il termine *log* deriva dal gergo marinaro *to log*, che significa registrare sul giornale di bordo; esso è ormai divenuto terminologia comune nell'industria petrolifera, ed indica generalmente una serie di registrazioni in pozzo. La compilazione del *Master log* procede di pari passo con l'avanzamento del pozzo e rappresenta, in cantiere, il riferimento per stimare i dati geologici più significativi, in particolare la successione litologica e le eventuali manifestazioni di idrocarburi.

Il *Master Log* è composto generalmente da rappresentazioni in funzione della profondità delle grandezze investigate. Oltre ad informazioni di carattere descrittivo, contenute nell'intestazione del documento, sono generalmente riportati: le date della misura o della stima, la densità e la viscosità del fango utilizzato, l'andamento grafico dell'*ROP*, il tipo, la marca, il numero di serie ed il diametro dello scalpello utilizzato, i valori di *WOB*, *RPM*, *Q*, l'angolo di deviazione del foro, alcune note sull'utilizzo d'attrezzature particolari, la composizione litologica, la rappresentazione delle percentuali di calcite e di carbonati presenti nei *cutting*, la percentuale di gas totale rilevato, la cromatografia del gas, le profondità in cui si mostra la venuta a giorno delle mineralizzazioni visibili ad occhio nudo, le manifestazioni di olio, l'indicazione dei punti in cui sono stati effettuati i carotaggi sia di parete che di fondo foro, i *casing*.

Il secondo documento usato per la compilazione del *FDC* è il Profilo 1:1000, composto anch'esso da rappresentazioni in funzione della profondità delle grandezze investigate (vedi figura seguente). Oltre ad informazioni di carattere descrittivo, contenute nell'intestazione del documento, ed a quelle già descritte nel *Master Log* sono riportati: l'età e il nome delle formazioni attraversate durante la perforazione, l'*arrow plot* (il valore dell'inclinazione e della direzione), la resistività della formazione attraversata e la rappresentazione del tempo di transito del *log* sonico.

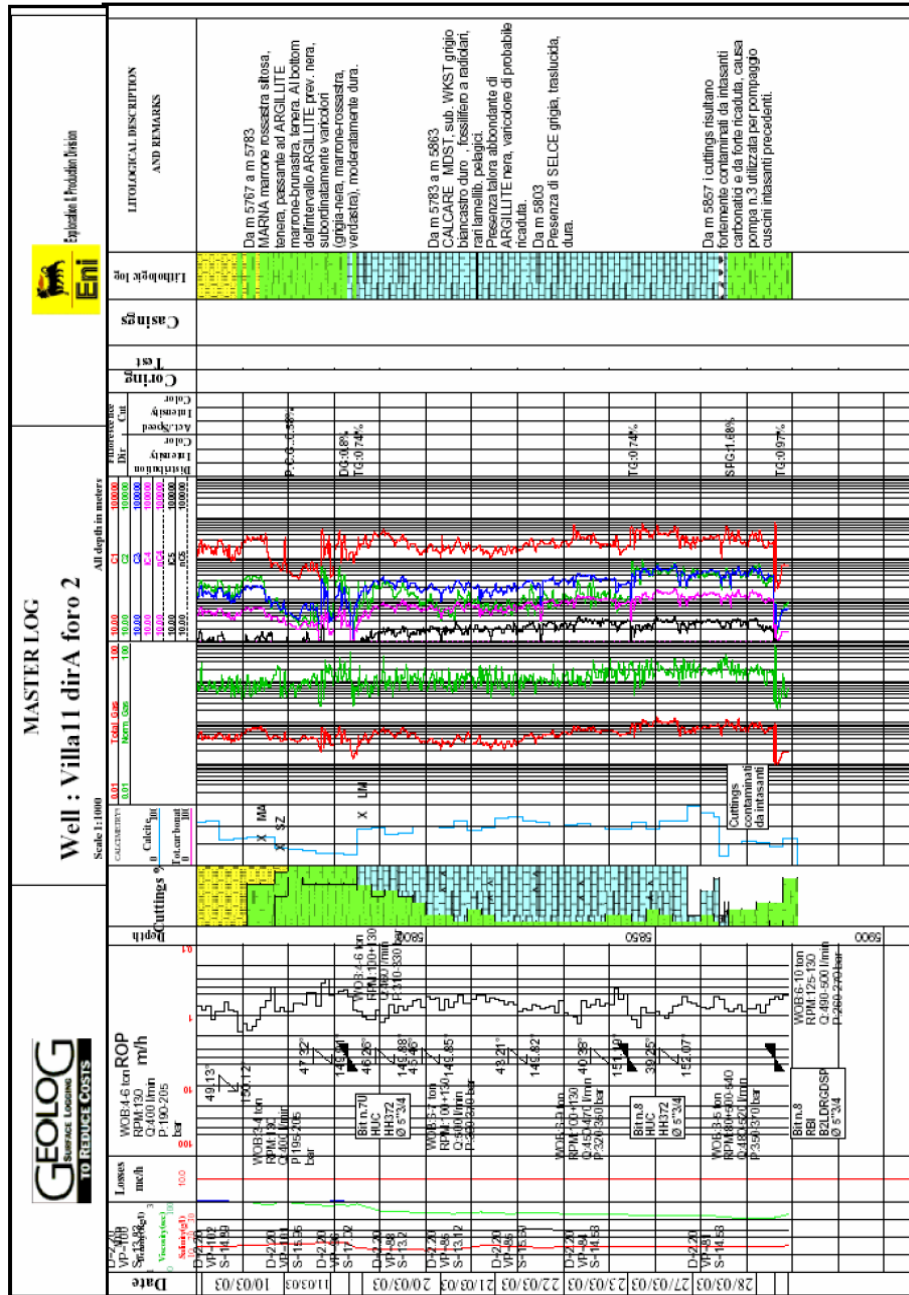


Figura 55: esempio di *Master Log*.

Il *FDC* è costituito da tabelle di “*clustering* geotecnico” delle formazioni [43], composte di righe costituenti, ognuna, una stringa d’informazioni riferite ad un intervallo perforato o *minimum interval* (*MI*), che si deve differenziare dal precedente e



dal successivo per la variazione di uno o più dei seguenti parametri: formazione, unità o membro stratigrafici, litologia, tipo di scalpello (battuta) ed *ROP* media sul *MI*.

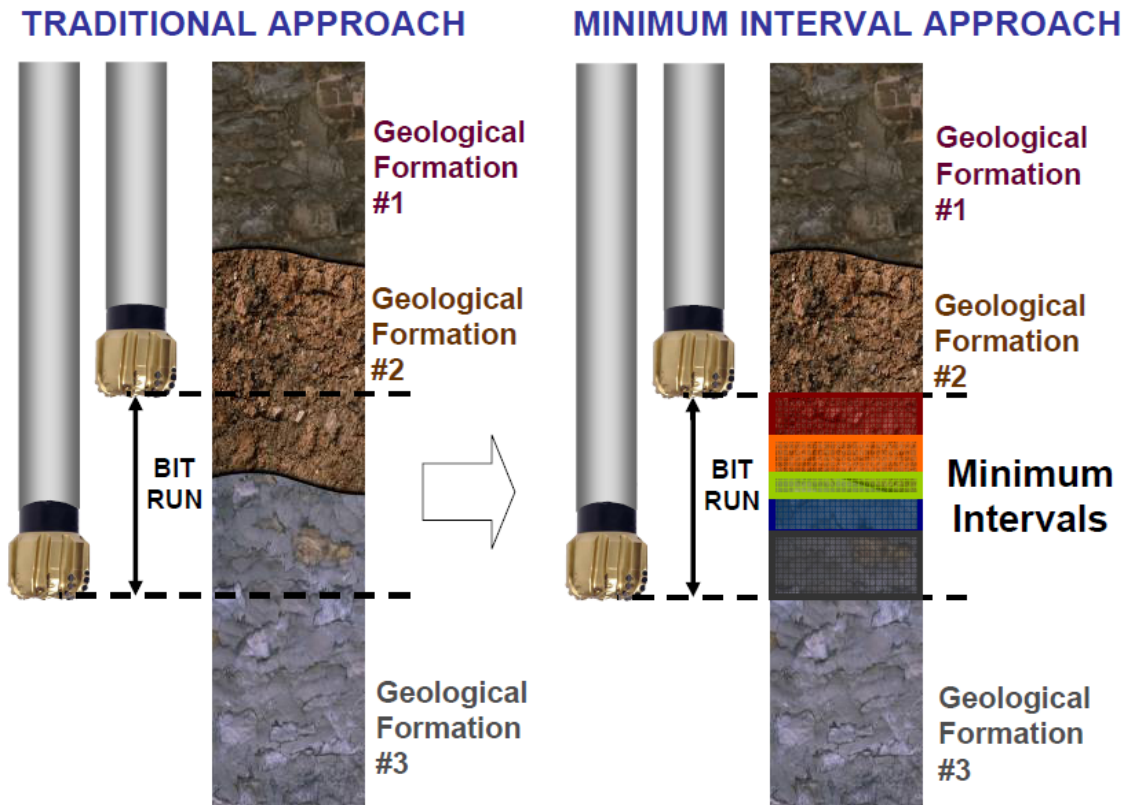


Figura 56: approccio tradizionale alla valutazione delle *performance* di uno scalpello (sinistra); nuovo approccio contenuto nel *FDC*, con l'utilizzo del concetto di *minimum interval* (destra).

Si ricordano, brevemente, i concetti espressi sopra [44]: un'unità litostratigrafica è un corpo roccioso definito sulla base di caratteri litologici, sedimentologici, mineralogici e petrografici (tipo di roccia, colore, granulometria, compattezza, presenza di particolari minerali, stratificazione e scistosità). Le unità litostatigrafiche sono definite nel loro ordine decrescente in gruppo, formazione, membro, strato. Il gruppo comprende due o più formazioni associate verticalmente o lateralmente aventi caratteri litologici comuni, la formazione è l'unità fondamentale caratterizzata da litologia uniforme distinta

rispetto a quella delle unità adiacenti (una formazione è definibile come tale, indipendentemente dallo spessore e dall'età). Il membro è una sotto unità di formazione, individuato da una variazione litologica locale [44].

Nel *FDC*, la variazione dovuta alla litologia è stata stimata secondo i criteri utilizzati dall'Unità di Geologia Operativa (G.E.O.P.) di Eni S.p.A. Div. E&P, che permettono di individuare le diverse unità e sequenze litologiche presenti in pozzo. Esse rappresentano, frequentemente, nuovi dettagli definiti dal punto di vista stratigrafico [43].

Il *FDC* è costruito seguendo una rigorosa procedura operativa che identifica i contenuti delle celle delle tabelle di “*clustering* geotecnico” delle formazioni.

Per ogni pozzo di cui sono disponibili il Master Log ed il Profilo 1:1000 è possibile compilare la tabella di “*clustering* geotecnico”: l'unione di più tabelle costituisce il *FDC*.

Per ogni *minimum interval*, nella loro stesura originale, la tabella per il “*clustering* geotecnico” delle formazioni contiene trentanove registrazioni (cinque qualitative e trentaquattro quantitative) così suddivise: i dati identificativi del pozzo (il codice *corporate* Eni S.p.A. Div. E&P, il nome e la data di fine perforazione), il nome della formazione perforata, il nome dell'unità o del membro stratigrafico, la profondità del *top*, del *bottom* e lo spessore del *minimum interval*, i codici e le percentuali dei tre litotipi maggiormente presenti (da dizionario litologico del G.E.O.P.), la pendenza di strato media del *minimum interval*, l'*azimut* della pendenza di strato media del *minimum interval*, una valutazione del grado di fatturazione della roccia (sconosciuta, bassa, media, alta), un'indicazione delle caratteristiche della struttura della roccia (es. alloctona), il valore del tempo di transito misurato con il *log* sonico, i valori delle misure del *Formation Integrity Test* e del *Leak Off Test*, l'inclinazione del foro e l'*azimut* dell'inclinazione del foro al *top* e al *bottom* del *minimum interval*, il diametro dello scalpello utilizzato e la tecnica di perforazione adottata in quel *minimum interval* (es. *Turbodrilling*, *Rotary*, *Slyding*, uso di *Sthraigthole Drilling Device*, *Rotary Coring*), il nome dell'Azienda produttrice dello scalpello, il codice *IADC*, se il *bit* disceso è nuovo (*New*) o ree-run (*RR*), la profondità d'estrazione dello scalpello, l'intervallo perforato,

*l'ROP* media sul *minimum interval*, un'identificazione del fango utilizzato, la densità del fango al *top* ed al *bottom* del *minimum interval*, una suddivisione della formazione attraversata con un'indicazione numerica del grado di difficoltà per perforarla, ulteriori informazioni che identificano i problemi tecnici e le note ritenute utili per una migliore comprensione del contesto operativo.

Un obiettivo del Progetto *Bit Performance* è la costruzione di un *database* da utilizzare per la valutazione delle *performance* degli scalpelli di perforazione. Siccome il concetto di *minimum interval* implementato nel *FDC* risulta particolarmente interessante ai fini del presente Progetto di ricerca, il *FDC* è stato ampliato dei parametri necessari per la valutazione delle *performance* degli scalpelli. La procedura operativa aggiornata per la compilazione della parte geologica del *FDC*, sviluppata da G.E.O.P. in collaborazione con l'Università di Bologna, è riportata nell'allegato 1.

Per l'applicazione del *Bit Index* e dell'*Economic Index* al *FDC* è necessario ampliare il numero di parametri classificati. In base all'eq. (36), per il calcolo del  $BI_Z$  sono necessari i valori del peso sullo scalpello (*WOB*), della velocità di rotazione dell'utensile (*RPM*), della portata di fango (*Q*), della densità del fango (*MW*), dell'area totale di flusso delle duse dello scalpello (*TFA*), della velocità di avanzamento (*ROP*), dell'intervallo perforato (*H*), del valore della coppia (*TQ*) e la valutazione dell'usura dello scalpello (*DG*) di almeno due scalpelli.

Nel *FDC* sono contenuti i valori di *ROP*, *H* e *MW* calcolati sul MI: tutti gli altri valori sono da inserire come nuove celle nella tabella di “*clustering* geotecnico” delle formazioni.

Il *Master Log* ed il *Profilo* 1:1000 non contengono i dati sopra richiesti, per cui è necessario reperirli da altri documenti di cantiere in possesso di Eni S.p.A. Div. E&P.

Attualmente la compagnia di *Mud Logging* registra e controlla la maggior parte dei parametri di perforazione necessari per il calcolo del *BI* in tempo reale e li visualizza tramite curve, in funzione della profondità e del tempo, su appositi grafici; l'acquisizione dei valori relativi a tali parametri è effettuato in funzione della profondità, ogni 25 cm (o ogni piede) per alcuni parametri, ed in funzione del tempo, ogni 5 secondi, per altri.

Nella figura seguente è riportato un esempio di visualizzazione dei parametri in funzione della profondità.

Per l'ampliamento del *FDC* i parametri che interessano sono quelli generalmente registrati in funzione della profondità, che sono: *Depth Bit (measured)*, *Depth Bit (vertical)*, *Elapsed Time*, *Total Gas*, *Methane*, *Ethane*, *Propane*, *I Butane*, *N Butane*, *I Pentane*, *N Pentane*, *Rate of Penetration*, *Mud Flow IN*, *Mud Flow OUT*, *Mud Flow Out %*, *Mud Density In*, *Mud Density Out*, *Bit size*, *Surface Weight on Bit*, *Hook-load*, *Mud Losses*, *Tank volume*, *Stand Pipe Pressure*, *Surface Rotary Torque*, *Surface Rotary speed*, *Downhole Bit revolution*, *Mud Temperature Out*, *Mud Temperature In*, *QFT2 - Weight % oil* e *QFT2 - Oil API gravity*.

Tutte le misure acquisite sono essenziali sia per la sorveglianza geologica che per il controllo e l'ottimizzazione della perforazione.

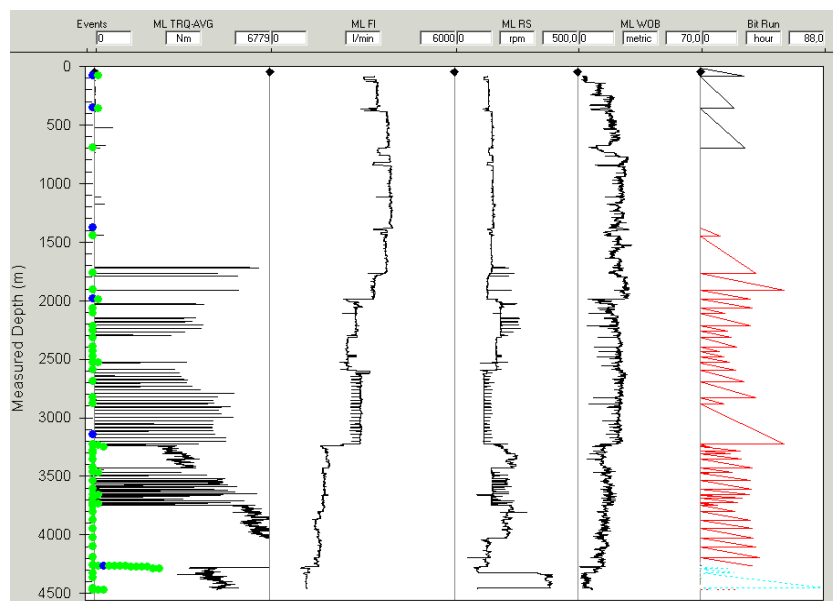


Figura 57: esempio di visualizzazione in funzione della profondità dei parametri registrati dalla compagnia di *Mud Logging* (elaborazione con il software *Genesis Analyzer, TDE*)

Per il calcolo del *Bit Index*, in base all'eq. (36), il *FDC* può essere ampliato con i seguenti dati registrati dalla compagnia di *Mud Logging*: il peso sullo scalpello (*Surface*

*Weight on Bit*), la velocità di rotazione dell'utensile (*Surface Rotary speed*), la portata di fango (*Mud Flow*), il valore del momento torcente (*Surface Rotary Torque*). Questi parametri sono inseriti nella tabella di “*clustering geotecnico*” delle formazioni come valori medi calcolati sul *minimum interval*.

Per completare il calcolo del  $BI_Z$  in base all'eq. (36) sono necessari i valori dell'area totale di flusso e la valutazione dell'usura dello scalpello (valori  $DG_1$  e  $DG_2$ ). Tale dati sono dedotti dal *bit record*, un documento riassuntivo dove sono registrate tutte le battute degli scalpelli utilizzati in un pozzo e che riporta anche i primi due valori numerici di stima dell'usura della struttura tagliente. Si ricorda che  $DG$  è calcolato in funzione di  $DG_1$  e  $DG_2$  in base all'eq. (35), tali valori sono registrati al termine della battuta e sono delle stime (in ottavi di unità) effettuate dall'operatore che analizza lo scalpello estratto dal pozzo.

Le informazioni contenute nel FDC sono riferite al *minimum interval*; per rapportare il valore di  $DG$  al  $MI$  (pedice  $MI$ ) è necessario applicare le seguenti equazioni:

$$DG_{MI} = (0,75 \cdot DG_1 + 0,5 \cdot DG_2) \cdot \frac{d_{MI}}{D_{MI}} \quad (39)$$

$$d_{MI} = \frac{H_{MI}}{ROP_{MI}} \quad (40)$$

$$D_{MI} = \sum_{i=1}^n d_{MI} \quad (41)$$

dove il valore dell'usura dello scalpello riferita al  $MI$ , indicata con  $DG_{MI}$ , è calcolata con l'ausilio dei due valori numerici di stima dell'usura della struttura tagliente dello scalpello, normalizzata sul tempo di perforazione del  $MI$  ( $d_{MI}$ ), calcolato in base allo spessore del  $MI$  ( $H_{MI}$ ) ed alla velocità di avanzamento dello scalpello ( $ROP_{MI}$ ). Considerando un numero di  $MI$  pari ad  $n$ , deve essere rispettato il vincolo di continuità espresso dall'equazione seguente:

$$\sum_{i=1}^n DG_{MI} = 0,75 \cdot DG_1 + 0,5 \cdot DG_2 \quad (42)$$

In base alle equazioni precedenti, si considera l'usura dell'utensile proporzionale al tempo di perforazione.

La tabella per il “*clustering* geotecnico” delle formazioni, ampliata dei parametri peso sullo scalpello, velocità di rotazione dell'utensile, portata di fango, area totale di flusso, torsione e valutazione dell'usura, tutti riferiti al *minimum interval* come descritto nelle righe precedenti, è idonea perché vi possa essere applicato il calcolo del *Bit Index*.

In base all'eq. (49), la stima dell'*Economic Index* può essere effettuata conoscendo il valore del *Bit Index* e del costo dell'utensile che, essendo piuttosto variabile è impostato come valore medio di mercato, attualizzato all'anno di stima dell'*EI*, per tipologie omogenee di utensili (*rolling cutter* e *fixed cutter*).

I capitoli successivi ed in particolare l'allegato 2, definiscono gli elementi operativi per la compilazione della tabella di “*clustering* geotecnico” delle formazioni ampliata per il calcolo del *BI* e dell'*EI*.

## 6.2 Indagini sul concetto di perforabilità della formazione

Storicamente, nelle attività di perforazione, è nota la necessità di studiare il concetto perforabilità della roccia, importante non solo per quantificare l'efficacia della perforazione e l'usura degli utensili, ma anche perché la stima e la valutazione di tale fattore dovrebbe incidere sulla scelta dell'utensile più adatto e, quindi, sull'economicità del processo [45].

Sono presentati due modelli di perforabilità delle formazioni, il primo legato ad un metodo di studio sviluppato da Agip negli anni settanta, il *sigmalog*, ed un nuovo indice studiato basandosi su considerazioni di tipo energetico.

In generale, la perforabilità di una formazione può essere definita come l'attitudine della stessa ad essere perforata con un determinato processo e/o da un particolare utensile.

Il parametro perforabilità non è perciò univoco ed è influenzato da un certo numero di fattori che, a tutt'oggi, non sono ancora ben identificati.

Due proprietà solitamente utilizzate per la valutazione della perforabilità sono la resistenza a compressione non confinata (*UCS*) e la resistenza a trazione della roccia, tuttavia, come mostrato nella figura seguente, le relazioni che nascono tra la velocità di avanzamento e questi parametri non sono ben definite [45].

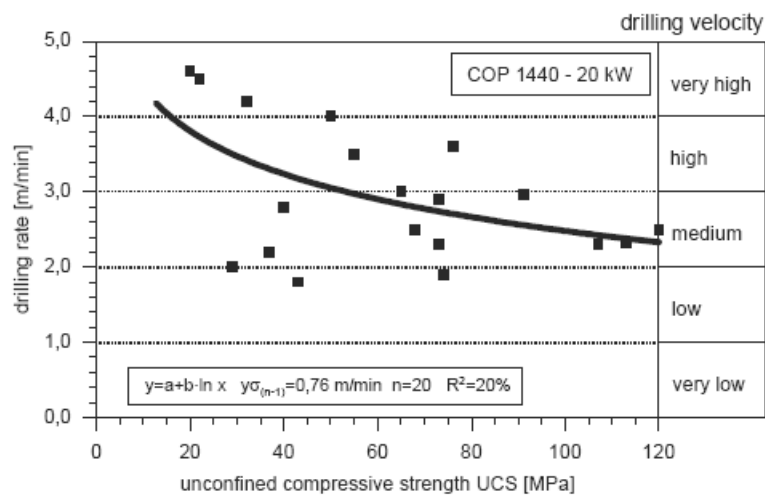


Figura 58: Esempio di correlazione tra *UCS* e velocità di avanzamento [45].

Occorre accennare anche all'influenza dell'anisotropia: la velocità di avanzamento potrebbe essere influenzate anche dall'orientamento delle superfici di minor resistenza associate alla direzione cui si perfora.

In base a studi fatti su campioni [45], è possibile affermare che quando la direzione di perforazione forma un angolo retto con l'orientamento della stratificazione, il materiale roccioso è compresso e rimosso parallelamente a se stesso; solitamente in questo caso sono ottenute le maggiori velocità di perforazione e l'avanzamento è controllato dalla resistenza al taglio.

Il metodo del *sigmalog* è stato sviluppato dall'Agip negli anni settanta, per lo studio delle sovrappressioni in un pozzo [46]. Il calcolo del *sigmalog* si può suddividere in due parti una relativa alla valutazione della perforabilità della roccia ed una alla stima della condizione di squilibrio tra la pressione idrostatica del fluido di perforazione e la pressione dei fluidi di strato. Il metodo non segue una logica rigorosamente analitica, essendo derivato da considerazioni e leggi empiriche. Il *sigmalog* parte dalla determinazione di un indice di perforabilità della roccia, chiamato  $\sqrt{\sigma t}$  ed identificato con l'equazione seguente:

$$\sqrt{\sigma t} = \frac{WOB^{0,5} \cdot RPM^{0,25}}{BD \cdot ROP^{0,25}} \quad (43)$$

Sostanzialmente il  $\sqrt{\sigma t}$  è il corrispettivo del *d-exp* (*drilling exponent*) [28], un altro indice utilizzato per la valutazione delle sovrappressioni in pozzo, che è espresso secondo la seguente equazione:

$$d \exp = \log \frac{3,2 \cdot ROP}{60 \cdot RPM} \cdot \log \frac{100 \cdot BD}{2,64 \cdot WOB} \quad (44)$$

Entrambi gli indici possono essere calcolati con i valori normalmente registrati in pozzo durante la perforazione e classificati nel *FDC* ampliato.

L'equazione di  $\sqrt{\sigma t}$  è simile a quella della *Specific Energy* descritta nei capitoli precedenti.

Dall'analisi della composizione di  $\sqrt{\sigma t}$  e *d-exp*, si nota come siano indici di tipo sperimentale per cui non c'è sempre una corrispondenza tra la loro dimensione fisica e ciò che tentano di rappresentare.



Per il calcolo del *Bit index* in base all'eq. (37) è necessario poter disporre di una valutazione numerica della perforabilità della formazione. Il gruppo di lavoro del Progetto *Bit Performance* non ha ritenuto significativi  $\sqrt{\sigma t}$  e *d-exp* come indici di perforabilità della formazione, soprattutto perché derivavano da dati sperimentali e circostanziati alle aree geografiche in cui sono stati sviluppati. E' quindi stato studiato un nuovo indice ( $SE_M$ ) che deriva dall'Energia Specifica, e potrebbe rappresentare una nuova valutazione della perforabilità della formazione:

$$SE_M = \text{Log} \left( 4 \cdot \frac{WOB}{\pi \cdot BD^2} \cdot \frac{TVD \cdot RPM}{ROP} \right) \quad (45)$$

$SE_M$  si misura in *Pa*, o  $J/m^3$ , *TVD* indica la profondità reale verticale e *BD* il diametro dello scalpello.  $SE_M$  è composto da due fattori, il primo può essere assimilato alla pressione agente sul fondo del foro, moltiplicata per un secondo fattore, che è un numero adimensionale, dato dalla composizione di *TVD*, *RPM* ed *ROP*.

Il valore di  $SE_M$  sembra rappresentare un indice di perforabilità della formazione perché tiene conto della profondità verticale che non è considerata nelle eq. (54) e (55), considera due dei parametri da cui dipende la meccanica della perforazione e che possono essere controllati dall'operatore (*WOB*, *RPM*) e dalla *ROP* che, a parità di tutti gli altri fattori, risente in modo diretto delle variazioni geologiche/geomeccaniche del sottosuolo. In base all'eq. (45), più il valore di  $SE_M$  è alto, più la perforabilità della formazione è considerata bassa.

I calcoli di  $\sqrt{\sigma t}$ , *d-exp* ed  $SE_M$  applicati al *FDC* ampliato, sono descritti nell'ottava parte della relazione.

### 6.3 Implementazione del *database Formation Drillability Catalog*

A seguito dell'applicazione di modelli di perforabilità al *FDC* ampliato descritti nella parte ottava della presente relazione, si procede alla costruzione del *database FDC* che

contiene, suddiviso per *MI*, i dati del “*clustering* geotecnico” delle formazioni, i parametri oggetto dell’ampliamento (es. *WOB*, *RPM*, ecc.), i costi, informazioni sulla composizione della batteria di perforazione (*BHA*), i parametri di benchmark per il calcolo dei *Bit Index*, i calcoli di *Bit Index*, *Economic Index*, *Specific Energy* (anche nella sua forma modificata come valutazione della perforabilità della formazione) e il costo/metro.

Il presente paragrafo descrive la composizione del *database* FDC, creato dal servizio S.I.S.B. di Eni S.p.A. Div. E&P in collaborazione con l’Università di Bologna, che deriva dall’ampliamento del *Formation Drillability Catalog* a seguito delle esigenze del Progetto *Bit Performance*.

Il presente paragrafo è collegato all’allegato 2 (parametri classificati nel *database* FDC), dove, per ognuna delle dieci tabelle che vi sono riportate, la prima riga rappresenta il numero progressivo della cella, la seconda il nome utilizzato nel *database Oracle* per l’identificazione del parametro, la terza riga il nome che si trova sui documenti di base da cui trarre il dato. Dalla quarta riga in avanti (non riportate in allegato 2), ci sono i vari *MI* che costituiscono la suddivisione delle battute degli scalpelli nei vari pozzi.

I nomi e gli acronimi utilizzati nella terza riga delle tabelle sono quelli normalmente utilizzati nei documenti contenuti nei *database* di Eni S.p.A. Div. E&P.

In riferimento all’allegato 2, si espongono i contenuti delle singole celle, evidenziando da dove trarre il dato e l’eventuale espressione utilizzata per calcolarlo: in questo modo si costruiscono le linee guida per la redazione della procedura operativa di caricamento dati nel *database* FDC e per il calcolo dei parametri di valutazione delle *performance* degli scalpelli.

Le celle dalla n. 1 alla n. 43 e le celle n. 93, 94 consistono nel “*clustering* geotecnico” delle formazioni: costituiscono il cuore della sezione geologica del *FDC* e sono compilate da G.E.O.P. (attualmente in collaborazione con la Compagnia di Servizio *Ecopetrol*) seguendo la procedura riportata nell’allegato 1 della presente relazione

(procedura per la compilazione della sezione geologica del *Formation Drillability Catalog*).

Le celle dalla n. 44 alla n. 69 consistono nel primo ampliamento del *FDC* geologico: i dati contenuti derivano da quelli registrati in continuo, in termini di profondità crescente, dalla Compagnia di *Mud Logging*; ogni cella contiene il valore del parametro riferito al *MI*.

Questi dati sono normalmente conservati nei *database Corporate, Power* o *Genesis* di Eni S.p.A. Div. E&P con il nome “*Log\_vs\_depth*”.

Le celle n. 44 e n. 45 sono identificate considerando, per ogni *top* ed ogni *bottom* di un *MI* (celle n. 7 e n. 8), il valore corrispondente della profondità verticale di perforazione (*DTVD, Drilling True Vertical Depth*) registrata dalla compagnia di *Mud Logging*. Se questo valore non è registrato, tali celle sono popolate con la seguente equazione, che considera un’approssimazione della profondità verticale di perforazione in funzione dell’inclinazione del pozzo e della profondità di perforazione (registrazioni n. 23, 25 e n. 7, 8):

$$DTVD_{Bott} = DTVD_{Top} + \left| (MI_{Bott} - MI_{Top}) \cdot \cos\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) \right| \quad (46)$$

dove  $DTVD_{Bott}$  e  $DTVD_{Top}$  rappresentano i valori contenuti nelle celle n. 44, 45,  $MI_{Bott}$  e  $MI_{Top}$  costituiscono i dati che popolano le celle n. 7, 8,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  sono l’inclinazione del pozzo al *top* ed al *bottom* del *MI* contenuti nelle celle n. 23, 25.

Il primo valore di  $DTVD_{Top}$  in ordine di profondità crescente, partendo dall’inizio del pozzo è, ovviamente, pari al valore  $MI_{Top}$  ed il  $DTVD_{Bott}$  di un *MI* coincide con il  $DTVD_{Top}$  del successivo.

Si ricorda l’importanza della celle n. 44 e n. 45 per il calcolo di  $SE_M$  tramite l’eq. (45).

La cella n. 46 è popolata con il parametro *ETIM*, che consiste nel progressivo del tempo trascorso, generalmente espresso in secondi oppure in hh.mm.ss, dall’inizio delle

attività di perforazione fino all'ultima registrazione della compagnia di *Mud Logging*. Nella cella n. 46 deve essere riportata la differenza tra il valore di *ETIM* corrispondente al bottom del *MI* (cella n.8) e quello del top del *MI* (cella n. 7).

Le celle dalla n. 47 alla n. 69 contengono il valore medio riferito al *MI* per il parametro registrato dalla Compagnia di *Mud Logging*. A titolo di esempio, il valore contenuto nella cella n. 58 (*WOB*) deriva dal valore registrato in continuo dalla Compagnia di *Mud Logging*. e mediato sul *MI*, la cui ampiezza è identificata dall'intervallo il cui *top* è indicato nella cella n. 7 (*top*) ed il bottom nella cella n. 8 (*bottom*).

L'equazione seguente identifica la metodologia utilizzata per popolare le celle dalla n. 47 alla n. 69:

$$Par_{MI} = \frac{\sum_{H(Top_{MI})}^{H(Bott_{MI})} Par_{SL}}{n} \quad (47)$$

dove  $Par_{MI}$  rappresenta il valore con cui le celle devono essere popolate (es. *WOB* riferito al *MI*),  $H(Bott_{MI})$  ed  $H(Top_{MI})$  rappresentano gli "estremi" dell'operazione di media da effettuare sui valori registrati in continuo dalla compagnia di *Mud Logging*, (celle n. 7, 8),  $Par_{SL}$  il parametro registrato in continuo (es. *WOB*, ogni 25 cm),  $n$  il numero di registrazioni del parametro  $Par_{SL}$  tra il *top* ed il *bottom* del *MI* ( $H(Bott_{MI})$  ed  $H(Top_{MI})$ ).

Le celle dalla n. 70 alla n. 91 derivano dai dati ricavati dai *bit record* contenuti nei rapporti finali di pozzo.

Il contenuto di queste celle del FDC deve essere la copia, riferita al *MI*, dei valori riportati nei *bit record*.

I documenti per popolare le celle dalla n. 70 alla n. 91 sono reperibili *database Corporate* di Eni S.p.A. Div. E&P, o in *Genesis* con il nome "*Bit\_Record*".

Le celle dalla n. 95 alla n. 111 derivano dai dati inerenti le composizioni delle *BHA*, contenute nei rapporti finali di pozzo.

Il contenuto di queste celle del FDC deve essere la copia, riferita al *MI*, dei valori riportati nei rapporti sulle composizioni delle *BHA*.

I documenti per popolare le celle dalla n. 95 alla n. 111 sono reperibili in formato prevalentemente cartaceo nei rapporti finali di pozzo catalogati nel *database Corporate* di Eni S.p.A. Div. E&P, o in *Genesis* con il nome “*BHA\_report*”.

Tante celle dalla n. 95 alla n. 111 quante sono gli elementi che compongono la *BHA* per quel *MI* sono direttamente caricate nel *database Oracle*.

La cella n. 112 identifica, in base al codice pozzo (cella n. 1) e con un collegamento ai *database* di Eni S.p.A. Div. E&P, se il pozzo cui il *MI* si riferisce è a terra o a mare ed il tipo d’impianto che è stato utilizzato per le operazioni di perforazione.

La cella n. 113 identifica il costo dello scalpello per i calcoli dell’*Economic Index* e del costo/metro. Non è attualmente previsto un collegamento con il *database* del servizio “contratti” di Eni S.p.A. Div. E&P. Essendo il costo dell’utensile un parametro estremamente difficoltoso da quantificare, sia per la quantità di scalpelli in commercio, sia per eventuali prezzi particolari che un Operatore riesce ad ottenere dalla Compagnia di Servizio, il gruppo di lavoro del Progetto *Bit Performance* ha deciso di identificare un costo medio di mercato per pollice e per ogni tipologia di utensile in commercio. A titolo indicativo sono previsti le seguenti tipologie di utensili: (1) scalpelli a taglienti mobili fresati, 1500 USD/pollice, (2) scalpelli a taglienti mobili con inserti, 3.500 USD/gg, (3) *PDC/TS*, 6.000 USD/gg, (4) *Impregnati/ND*, 8.000 USD/gg. E’ allo studio un’ulteriore suddivisione in base alle *feature* più frequenti per ogni tipologia di utensile.

La cella n. 114 identifica il costo dell’impianto di perforazione per il calcolo del costo/metro. I valori sono in base al tipo d’impianto ed al dato che popola la cella n. 112. A titolo indicativo sono previsti i seguenti impianti: (1) impianto a terra, 50.000 USD /gg, (2) *Jack Up*, 100.000 USD /gg, (3) *Semi Sub*, 200.000 USD/gg, (4) *Drilling Ship*, 300.000 USD /gg. E’ allo studio un’ulteriore suddivisione in base alla potenza dell’impianto, soprattutto per quelli a terra.

Per la valutazione dell'*Economic Index* e del costo/metro i valori economici da considerare devono essere attualizzati all'anno solare: questa procedura è implementata nel *database FDC* con un sistema che, automaticamente, aggiorna i valori delle celle n. 113 e 114 con un tasso di attualizzazione medio di mercato (3%-4%).

Le celle dalla n. 115 alla n. 121 rappresentano i valori di *benchmark* per il calcolo del *Bit Index*. Questi parametri, di base, sono calcolati come la media dei valori a cui sono riferiti a parità di formazione perforata (cella n. 5) e diametro dello scalpello (cella n. 27). Per esempio (pedice *e*), per trovare il valore  $TRPM_e$  della cella n. 116 (*Benchmark TRPM, Benchmark Total Round per Minute*) per un determinato  $MI_e$ , che classifica uno scalpello di diametro  $BD_e$  indicato nella cella n. 27 che ha perforato la formazione  $F_e$  indicata nella cella n. 5, si calcola la media dei valori di  $TRPM$  (cella n. 64) di tutti i  $MI$  che classificano scalpelli di diametro  $BD_e$  che hanno perforato la formazione  $F_e$ .

Le celle da n. 122 a n. 125 classificano le costanti parametriche (pesi) per il calcolo dei *Bit Index*. Si ricorda che, per ogni  $MI$ , la somma delle celle dalla n. 122 alla n. 125 deve essere uguale ad uno.

La cella n. 126 è popolata con il calcolo del  $BI_z$ . Per ogni  $MI$ , in base all'eq. (36), si definisce la seguente equazione per il calcolo del *Bit Index* ( $BI_{zMI}$ ):

$$BI_{zMI} = \frac{1}{3} \left( \frac{WOB_{bMI}}{WOB_{zMI}} + \frac{RPM_{bMI}}{RPM_{zMI}} + \frac{HHP_{bMI}}{HHP_{zMI}} \right) \cdot \left( \frac{ROP_{zMI}}{ROP_{bMI}} C_{ROP_{MI}} + \frac{TQ_{bMI}}{TQ_{zMI}} C_{TQ_{MI}} + \frac{H_{zMI}}{H_{bMI}} C_{H_{MI}} + \frac{DG_{bMI}}{DG_{zMI}} C_{DG_{MI}} \right) \quad (48)$$

dove i pedici  $b_{MI}$  rappresentano i parametri contenuti nelle celle dalla n. 115 alla n. 121, i pedici  $z_{MI}$  rappresentano i parametri contenuti nelle celle n. 35 (intervallo perforato), 36 (velocità di avanzamento), 58 (peso sullo scalpello), 62 (torsione), 64 (velocità di rotazione dello scalpello). Il parametro  $HHP$  è calcolato con l'eq. (42),  $DG$  è calcolato con l'ausilio dei due valori  $Wear_1$  (cella n. 83) e  $Wear_2$  (cella n. 84), riportati con i simboli  $DG_1$  e  $DG_2$  nell'eq. (50), riferendo tutti i valori al  $MI$ .

La cella n. 127 contiene il calcolo della Specific Energy in base all'eq. (10), con i valori riferiti al MI, come per la cella n. 129 si utilizza l'eq. (49).

La cella n. 128 consiste nel calcolo del costo/metro riferito al minimum interval. Il CM riferito alla battuta è normalizzato sulle ore di perforazione dei *MI*, utilizzando la seguente equazione:

$$CM_{MI} = \frac{R \cdot (\sum d_{MI} + t) + B}{\sum H_{MI}} \cdot \frac{d_{MI}}{D_{MI}} \quad (49)$$

dove, oltre ai simboli già noti, il costo dell'impianto *R* è classificato nella cella n. 114, il costo scalpello *B* nella cella n. 113 e tutti i valori sono riferiti al *MI*.

In questo modo, la somma dei vari  $CM_{MI}$  che compongono la battuta è uguale al  $CM_{RUN}$ , cioè il costo/metro riferito alla battuta, che popola la cella n. 135 dell'allegato 2.

La cella n. 130 è popolata con il calcolo di  $SE_M$  in base all'eq. (45) con tutti i valori sono riferiti al *MI*.

La cella n. 132 consiste nel calcolo del *Bit Index* riferito alla battuta dello scalpello ( $BI_{RUN}$ ) e, sulla base dell'eq. (37), il parametro che indica la valutazione della perforabilità delle formazioni è considerato  $SE_M$  calcolato in base all'eq. (45). L'espressione seguente è quella che è utilizzata per popolare la cella n. 132:

$$BI_{RUN} = \frac{\sum_{i=1}^h BI_{Z_{MI}} \cdot SE_M}{\sum_{i=1}^h SE_M} \quad (50)$$

dove, oltre ai simboli già noti, *h* rappresenta il numero di MI che compongono la battuta.

La figura seguente identifica graficamente ciò che è espresso nell'equazione precedente.

La cella n. 132 consiste nel calcolo dell'*Economic Index* in base all'equazione seguente:

$$EI_{RUN} = \frac{BitCost_z}{BI_{RUN}} \quad (51)$$

dove  $BitCost_z$  è il parametro classificato nella cella n. 113.

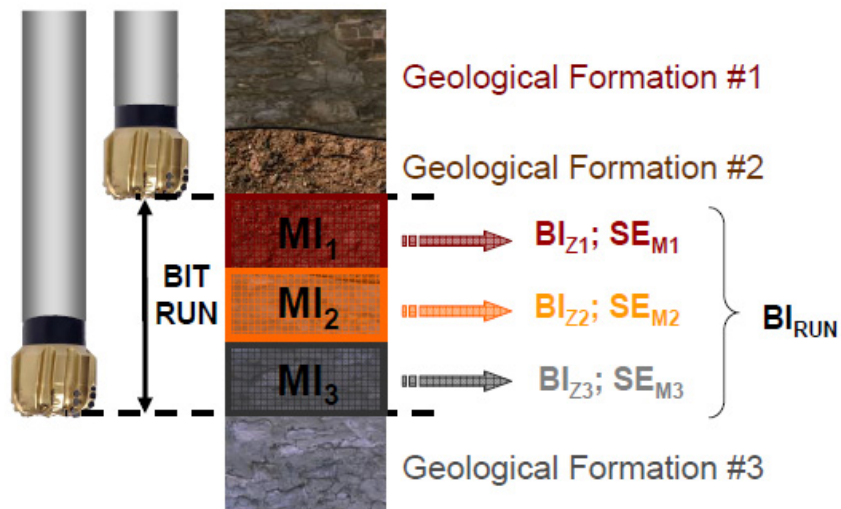


Figura 59: esempio di calcolo del *Bit Index* per una battuta divisa in tre *minimum interval*.

La cella n. 134 ( $SE_{RUN}$ ) consiste nel calcolo dell'energia specifica con la metodologia dell'eq. (37) e (50): al posto del *Bit Index* è sostituito il valore della *Specific Energy* calcolato sul *MI*.

Le celle n. 131, 136, 137 consistono in note e ulteriori posizioni previste per future eventuali "ampliamenti" del *database FDC*.

L'Università di Bologna, in collaborazione con S.I.S.B., ha realizzato una *macro* che funziona all'interno del *software Excel* per automatizzare i calcoli per popolare le celle



dalla n. 44 alla n. 111; le equazioni descritte nelle righe precedenti sono implementate nel *database Oracle*.

Si ricorda che, per valorizzare la costruzione e l'utilizzo del *database FDC* sono stati impostati tutti i collegamenti possibili con i *database* di Eni S.p.A. Div. E&P.

Impostato il *database FDC* secondo quanto indicato nell'allegato 2, si è attivato il caricamento dei dati di pozzo per ottenere, in un sistema informatico, ciò che fino ad ora era stato contenuto in un foglio di calcolo commerciale.

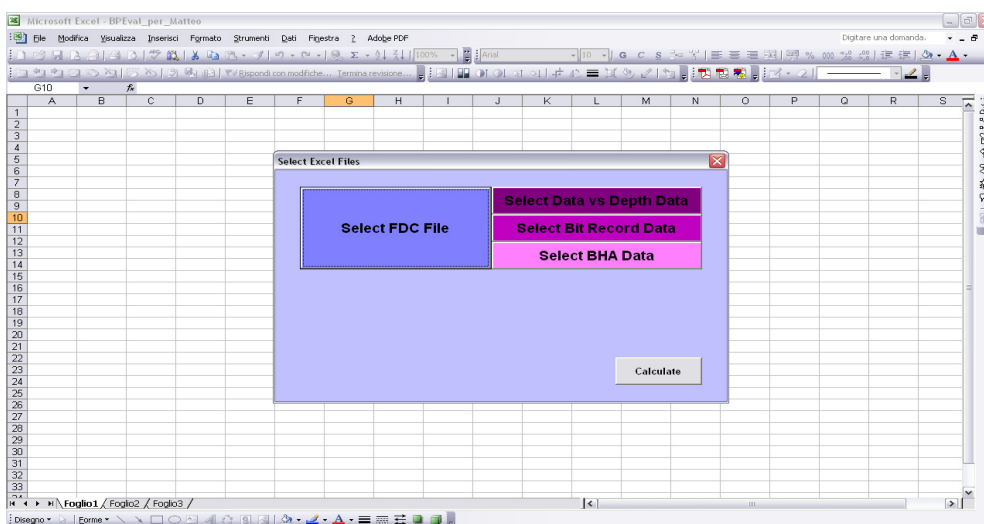


Figura 60: finestra di apertura della *macro* per popolare le celle dalla n. 44 alla n. 111 partendo dai dati in formato elettronico “*Data\_vs\_depth*”, “*Bit\_Record*”, “*BHA\_report*”.

Partendo dal *FDC* geologico, derivato dalle operazioni di “*clustering* geotecnico” effettuato da G.E.O.P. (con il supporto di *Ecopetrol*), si sono reperite, preferibilmente da *Genesis*, le registrazioni in continuo contenute nei file “*log\_vs\_depth*” ed i *bit record* e *BHA*.

I maggiori problemi riscontrati in questa fase di “approvvigionamento” dei dati consistono: (1) nella mancanza di omogeneità di registrazione in cantiere, sia come unità di misura che come tipologie di informazioni, (2) nella possibilità di disporre delle registrazioni che, soprattutto per i pozzi più vecchi, non sono sempre disponibili per

intero (sia come profondità che come tipologia di parametri registrati), (3) nella difficoltà d'applicazione delle equazioni precedentemente descritte ed implementate nelle *macro* di *Excel* e nel *database Oracle*, in quanto la divisione in *MI* non è sempre congrua con le battute degli scalpelli in pozzo.

In linea generale si può affermare che, eseguendo un calcolo automatico di popolamento delle celle del *database FDC* con l'ausilio di strumenti informatici, le discrepanze, che l'occhio umano tende ad "appianare" (es. un *MI* il cui spessore non coincide perfettamente con la fine della battuta), bloccano lo strumento di calcolo.

Un caso tipico che si è presentato ai tecnici di S.I.S.B. e dell'Università di Bologna riguarda l'ampiezza delle battute in confronto a quella dei *MI*. Per definizione [43], una battuta è composta da un numero finito di *minimum interval*. Popolando automaticamente il *database FDC*, partendo dal *FDC* costruito da *Ecopetrol* con la supervisione di G.E.O.P., la battuta non è sempre composta da un numero finito di *minimum interval*, per cui il sistema informatico (macro) si ferma. Per ovviare al problema si è impostato l'utilizzo del *bit record* per la definizione degli spessori dei *MI*, come evidenziato nella procedura riportata in allegato 1.

Alcuni problemi sono stati superati, ma altri, come la qualità del dato in entrata nel *database*, non sono completamente risolti, in quanto dipendono da fattori esterni al controllo del gruppo di lavoro del Progetto *Bit Performance*.

In base ai pozzi di cui il *FDC* geologico è disponibile ed ai dati per l'ampliamento, allo stato attuale il *database FDC* è popolato con i pozzi indicati nella tabella seguente.

Le maggiori difficoltà riscontrate in questa fase di preparazione del *file* descritto nell'allegato 2 sono essenzialmente legate alla qualità dei dati caricati nel *database*, che inficia negativamente l'intero processo di acquisizione del pozzo.

Si rimanda alla parte ottava ed alla parte nona della presente relazione per le descrizioni dei risultati ottenuti e delle criticità emerse.

## PARTE VII: IL SISTEMA DI SUPPORTO DECISIONALE *BIT PERFORMANCE*

### 7.1 Ambiti di utilizzo

Il Sistema di Supporto decisionale denominato *Bit Performance (BPE)* nasce dall'esigenza di elaborare e sviluppare uno strumento di valutazione e di analisi delle *performance* degli scalpelli di perforazione. Tale strumento, implementato per l'uso su Web, attualmente è disponibile solo sulla rete *intranet* di Eni S.p.A., anche se è intenzione di renderlo disponibile non appena possibile sia nei cantieri che negli uffici del gruppo stesso.

La caratteristica fondamentale del sistema *BPE* è di essere alimentato con il *database FDC*, che implementa la suddivisione delle formazioni in *minimum interval* [1]: calcolando il *Bit Index*, l'*Economic Index*, il costo/metro e la *Specific Energy*, il sistema *BPE* permette di associare ad ogni scalpello i suddetti quattro indici, che ne identificano le *performance* in modo disgiunto oppure "integrandoli" in modo opportuno tramite operazioni tipiche dei grandi *database*.

Il *BPE* può essere utilizzato sia in fase di progetto pozzo, sia durante la fase operativa di perforazione. Esempio tipico di quest'ultima possibile applicazione è la valutazione in cantiere delle *performance*, quando lo scalpello è ancora in pozzo, per stabilirne l'economicità, oppure, sempre come strumento di cantiere, come supporto in fase di scelta dello scalpello da utilizzare nella battuta successiva. Il *BPE* si rivela inoltre strategico per il tecnico che deve redigere un programma scalpelli per un nuovo pozzo in fase di pianificazione, ed è utile anche in fase consuntiva, a fine pozzo, per l'elaborazione dei documenti di *post-well analysis*, contribuendo in modo decisivo a migliorare i meccanismi dei processi del "Lesson Learning".

Il *BPE* è in fase di sviluppo da parte di S.I.S.B. con il supporto dell'Università di Bologna.

### 7.3 L'interfaccia utente ed i risultati

Come accennato, il *BPE* è attualmente disponibile solo nella rete *intranet* aziendale di Eni S.p.A. ed è accessibile tramite un *browser internet*. La prima pagina di apertura dell'applicazione è la seguente.

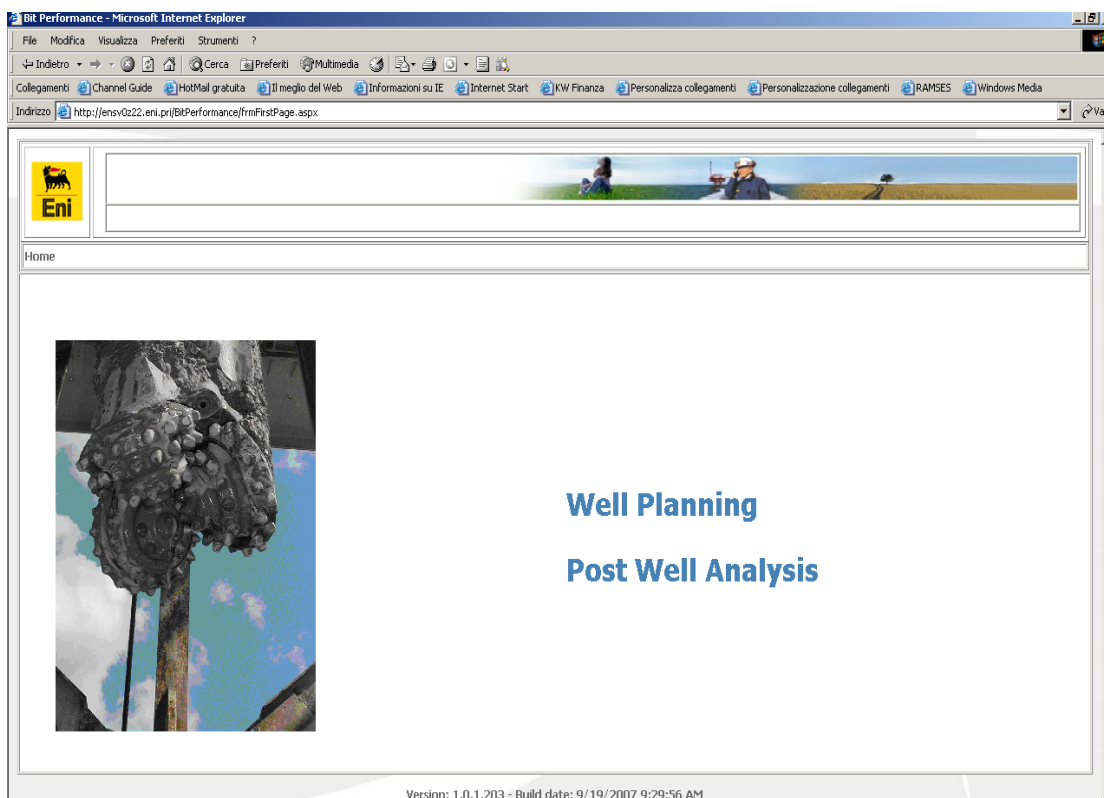


Figura 61: pagina di apertura del *BPE* (versione 1.0.1.203)

L'utente, cliccando sulle opzioni indicate in colore blu della pagina di apertura (*Well Planning* o *Post Well Analysis*), può scegliere se effettuare una valutazione delle *performance* degli scalpelli ai fini di una pianificazione di pozzo (*Well Planning*) oppure quando il pozzo è già stato completato (*Post Well Analysis*).

- **WELL PLANNING**

Cliccando sull'opzione *Well Planning*, si apre una seconda finestra, rappresentata nella figura seguente:

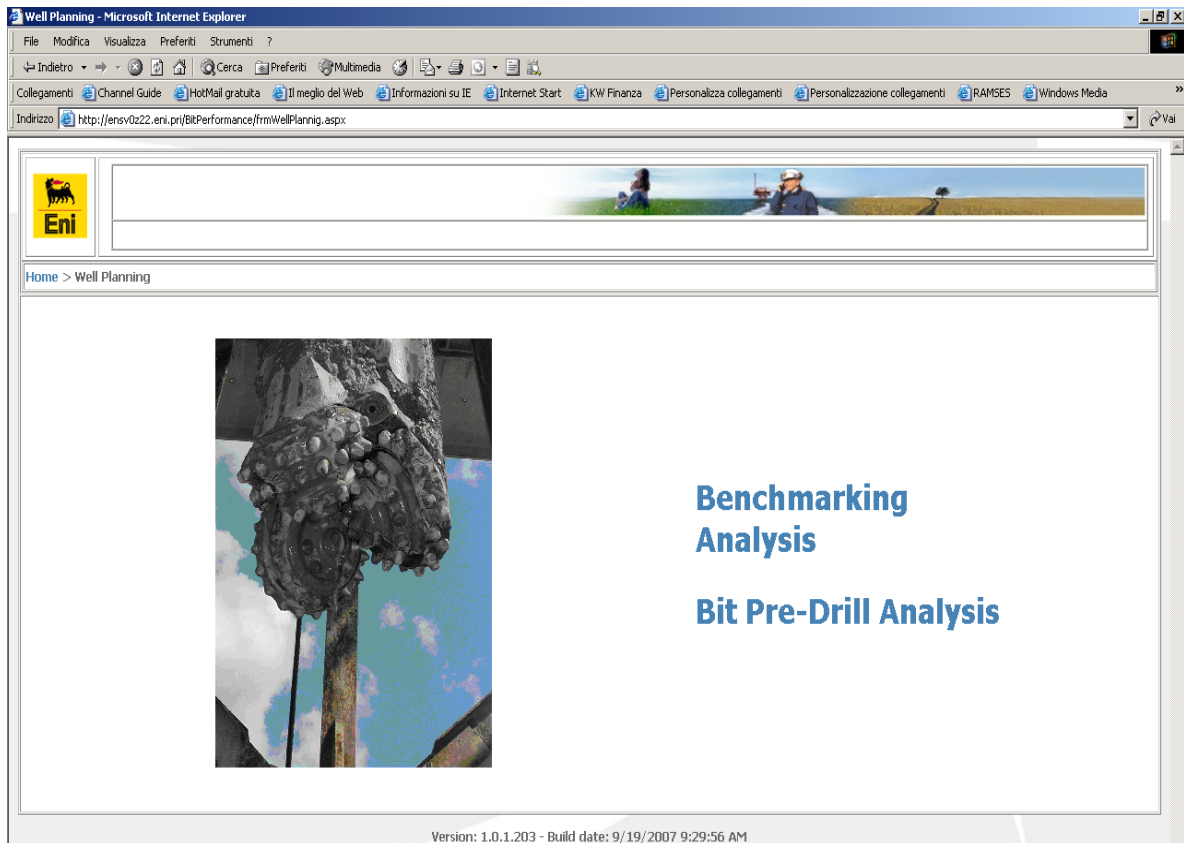


Figura 62: prima pagina dell'opzione *Well Planning*.

Scegliendo questa opzione, è possibile utilizzare il *database* del *BPE* per effettuare un'analisi di confronto tra uno o più scalpelli. Infatti, come riporta la Figura 62, si rendono disponibili nuovamente due opzioni (*Benchmarking Analysis*, *Bit Pre-Drill Ananlysis*): la prima, denominata *Benchmarking Analysis* permette di confrontare più scalpelli e stabilire quelli che hanno perforato con le migliori *performance*; la seconda, denominata *Bit Pre-Drill Analysis*, consiste invece nel confronto tra le presunte *performance* di uno scalpello che si vorrebbe utilizzare (ad esempio, gli scalpelli consigliati dalle compagnie di servizio, *etc.*), comparate con le *performance* di scalpelli già classificati nel *DBC*.

- **BENCHMARK ANALISYS**

Cliccando sull'opzione *Benchmarking Analysis*, si apre una terza finestra, rappresentata nella figura seguente.

The screenshot shows the 'Benchmarking Analysis' web application. The interface includes a navigation bar with the Eni logo and a breadcrumb trail: 'Home > Well Planning > Benchmarking Analysis'. The main content area contains the following elements:

- Field:** A dropdown menu with 'Val d'Agri' selected.
- Formation:** A dropdown menu with 'Unità Irpine' selected.
- Bit Diameter:** A dropdown menu with '12 1/4"' selected.
- Next step:** A button to proceed to the next step.
- Bit Costs (€):** A table with columns 'Bit Type' and 'Bit Cost'.
 

| Bit Type          | Bit Cost |
|-------------------|----------|
| PDC               | 67375    |
| TRICONI a INSERTI | 46550    |
- Benchmarks Values for Bit Indexes Calculation:** A table with columns 'WOB', 'TRPM', 'R.O.P.', 'Bit Footage', 'Torque', 'BHHP\*', and 'DG'.
 

| WOB  | TRPM  | R.O.P. | Bit Footage | Torque | BHHP* | DG  |
|------|-------|--------|-------------|--------|-------|-----|
| 11.6 | 165.1 | 6.0    | 237.3       | 784.1  | 314.7 | 4.7 |
- Proposed Weights for Bit Indexes Calculation:** A table with columns 'R.O.P.', 'Torque', 'Footage', and 'Dull', each with a value of 0.25.
- Results:** A button to view the results.

At the bottom of the page, the version and build date are displayed: 'Version: 1.0.0.30646 - Build date: 11/9/2007 5:01:32 PM'.

Figura 63: prima pagina dell'opzione *Benchmarking Analysis*.

In questa opzione il sistema *BPE* richiede all'utente di selezionare l'area geografica in cui effettuare l'analisi (ad esempio, Val d'Agri, *etc.*), il diametro del foro ed il tipo di formazione geologica d'interesse: si ricorda che il *BPE* si basa principalmente sull'utilizzo del *Bit Index*, per questo è possibile paragonare scalpelli che, a parità di diametro, hanno perforato la stessa formazione.

Una volta che sono stati selezionati questi campi, si aprono delle ulteriori finestre di dialogo, dove sono proposti dei parametri di base per una valutazione di tipo *standard*.

Tali parametri possono essere cambiati dall'utente del *BPE* se non si ritengono idonei per il tipo di analisi e per la situazione operativa o impiantistica caratteristica dell'area in oggetto (vedi Figura 63, tasto *edit*).

Tali parametri *standard* consistono in: (a) i costi (*Costs*) degli scalpelli selezionati e delle tariffe orarie degli impianti di perforazione per il calcolo del costo/metro e dell'*Economic Index*; (b) i valori dei parametri di confronto per il calcolo del *Bit Index* (le variabili dipendenti ed indipendenti dello scalpello di riferimento, o *Benchmark*), (c) i pesi (*Weights*) per il calcolo del *Bit Index*.

I costi sono stati scelti secondo i valori del mercato, considerando la tipologia di scalpello ed il tipo d'impianto. Per ulteriori chiarimenti su questi valori, e su come possono essere standardizzati e codificati, si veda la precedente relazione sulla prima fase del progetto, citata in apertura.

Si ricorda che la metodologia del *BI* è di tipo comparativo, cioè confronta i valori numerici dei parametri di almeno due scalpelli: in particolare, per un certo diametro dello scalpello ed una determinata formazione geologica, i valori delle variabili dello scalpello di riferimento (per es. *WOB<sub>b</sub>*, *RPM<sub>b</sub>*, etc.), sono calcolati dal *BPE* come media aritmetica tra tutti quelli caricati nel *database*, in riferimento a quel diametro di scalpello e formazione considerata.

Per quanto riguarda i pesi (*Weights*) per il calcolo del *Bit Index*, si ricorda che la somma dei pesi deve essere pari a uno (esiste un sistema di allerta che avverte l'utente se la somma è diversa da uno). Nel processo di valutazione delle *performance* dello scalpello, tali pesi esprimono, proporzionalmente, l'importanza che l'operatore assegna a ciascuna delle variabili dipendenti. Ad esempio, se si ritiene che la velocità di avanzamento sia da privilegiare in una certa situazione operativa, si darà un peso alto a *C<sub>ROP</sub>*, ovviamente a discapito dei pesi delle altre variabili dipendenti. Se una variabile dipendente (*ROP*, *H*, *TQ*, *DG*) vuole essere esclusa dal calcolo del *Bit Index* perché ritenuta poco significativa, basta assegnarle un peso uguale a zero.

Se l'utente cambia anche un solo dato proposto nelle tre categorie di parametri elencate sopra (*Costs*, *Weights*, *Benchmark*) il *database FDC* si riconfigura automaticamente,

ricependo le nuove indicazioni e ricalcolando tutte le equazioni che sono state implementate nel *database*.

Riassumendo, impostata l'area geografica, il diametro del foro e la formazione, scelti i valori di *Costs*, *Weights*, *Benchmark*, cliccando sul tasto *Results*, il sistema di supporto decisionale *BPE* elabora le informazioni impostate e fornisce i risultati indicati nella figura seguente.

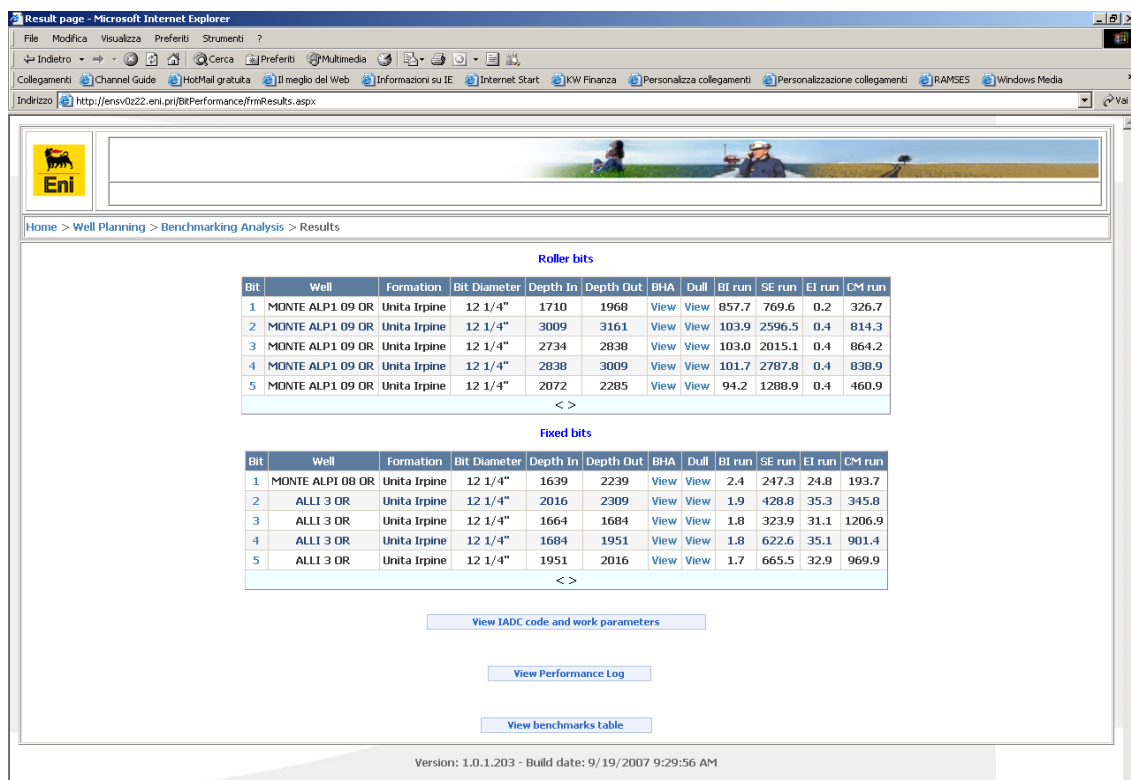


Figura 64: risultati del *BPE* a seguito dell'opzione *Benchmarking Analysis*.

In particolare (Figura 64), il *BPE* predispone una o più tabelle, divise per tipologia di scalpello (*Roller bits* e *Fixed cutter bits*), in cui sono elencate le cinque migliori battute (*Bit Run*) ordinate in base ai valori di *BI* decrescenti.

Si ricorda ancora una volta che la metodologia del *BI* è di tipo comparativo, cioè confronta i valori numerici dei parametri più scalpelli e genera un indice che è riferito



ad un valore unitario, cioè il valore del *BI* associato allo scalpello di riferimento [7,8]. Tra tutti gli scalpelli investigati, quello con il *BI* maggiore è quello che, per questa metodologia, ha ottenuto le migliori *performance*. Lo scalpello con il valore più alto di *Bit Index* è quindi quello che possiede le caratteristiche costruttive verso cui il *BPE* consiglia di indirizzare la scelta (*best performer bit*).

I risultati delle analisi del *BPE* (Figura 64), forniscono una schermata in cui compaiono una o più tabelle simili ad un *Bit Record* tradizionale. Ogni riga di queste tabelle indica la battuta di uno scalpello, in cui vi sono indicate informazioni come il pozzo a cui la battuta si riferisce (*Well*), la formazione perforata (*Formation*), il diametro dello scalpello (*Diameter*) e la profondità a cui è stato disceso in pozzo e quella a cui è stata interrotta la battuta (*Depth In e Depth Out*). In particolare, per ogni scalpello, sono indicati i valori di *BI*, *SE*, *CM*, *EI*. Per ogni battuta è prevista anche la possibilità di accedere, tramite collegamenti ipertestuali (campi alfanumerici cliccabili, evidenziati in colore azzurro), al *database* del *BPE*, per ottenere la composizione in *MI* della battuta (*Bit*), la composizione della batteria di perforazione (*BHA*) e la valutazione dell'usura dello scalpello (*Dull*).

Le righe che costituiscono le tabelle di Figura 64 rappresentano le battute degli scalpelli: cliccando sul numero del *Bit* è possibile accedere alla suddivisione in *MI* delle battute, rendendo visibili i dati che sono registrati nel *database FDC* (vedi figura seguente, in cui ogni riga della tabella visualizzata rappresenta un *Minimum Interval*).

| MINIMUM INTERVAL DATA |        |         |                  |          |                   |                 |                    |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------|--------|---------|------------------|----------|-------------------|-----------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| WELL ID NBR           | MI NBR | IADC CD | WELL NM          | BIT DIAM | R1 GEOL FORMATION | R1 GEOTECHNIQUE | DEPTH BIT TRIP OUT | WEAR 1 | WEAR 2 | WEAR 3 | WEAR 4 | WEAR 5 | WEAR 6 | WEAR 7 | WEAR 8 |
| 07691                 | 24     | 447     | MONTE ALP1 09 OR | 12 1/4"  | Unita Irsine      | Unita Irsine 3  | 1968               | 7      | 5      | BT     | A      | 0      | 1      | NO     | H      |
| 07691                 | 25     | 447     | MONTE ALP1 09 OR | 12 1/4"  | Unita Irsine      | Unita Irsine 3  | 1968               | 7      | 5      | BT     | A      | 0      | 1      | NO     | H      |
| 07691                 | 26     | 447     | MONTE ALP1 09 OR | 12 1/4"  | Unita Irsine      | Unita Irsine 3  | 1968               | 7      | 5      | BT     | A      | 0      | 1      | NO     | H      |

**Legend:**

|                         |  |                                     |  |
|-------------------------|--|-------------------------------------|--|
| WELL ID NBR             | = Well Code  | TOP MD (m)                          | = Top measured depth (Minimum Interval)    |
| MI NBR                  | = Minimum Interval Number                                | BOTTOM MD (m)                       | = Bottom measured depth (Minimum Interval) |
| IADC CD                 | = International Association of Drilling Contractors Code | THICKNESS (m)                       | = Minimum Interval Thickness               |
| WELL NM                 | = Well Name  | LITHL NTVL CD 1                     | = Lithological Code 1                      |
| BIT DIAM (inch)         | = Bit Diameter   | LITHL NTVL PERC 1 (%)               | = Lithological Code 1 Percentage           |
| R1 GEOL FORMATION       | = Classification generated by analyzing lithologies, etc | LITHL NTVL CD 2                     | = Lithological Code 2                      |
| R1 GEOTECHNIQUE         | = Classification generated by analyzing lithologies, etc | LITHL NTVL PERC 2 (%)               | = Lithological Code 2 Percentage           |
| DEPTH BIT TRIP OUT (m)  | = Depth of Bit Trip Out                                  | LITHL NTVL CD 3                     | = Lithological Code 3                      |
| WEAR 1                  | = Inner Rows   | LITHL NTVL PERC 3 (%)               | = Lithological Code 3 Percentage           |
| WEAR 2                  | = Outer Rows   | DIP AVG                             | = Dip Average                              |
| WEAR 3                  | = Dull Char  | DIP AZIMUT AVG (degree)             | = Dip Azimuth Average                      |
| WEAR 4                  | = Location   | FRACTURE DEGREE                     | = Fracturation Degree                      |
| WEAR 5                  | = Bearing/Seals  | STRUCT FEATURE                      | = Structural Feature                       |
| WEAR 6                  | = Gauge 1/16   | DELTA T AVG                         | = Average Deltat                           |
| WEAR 7                  | = Other Chars  | FIT MEAS                            | = Specific Gravity E.M.W.                  |
| WEAR 8                  | = Reason P.OOH   | LOT MEAS                            | = Specific Gravity E.M.W.                  |
| DG                      | = Dull Grading   | HOLE INCL AT TOP (degree)           | = Hole Inclination at Top                  |
| BI                      | = Bit Index (MI)   | AZIMUT HOLE INCL TOP (degree)       | = Azimuth Hole Inclination at Top          |
| SE (MJ/m <sup>3</sup> ) | = Specific Energy (MI)                                   | HOLE INCL AT BOTTOM (degree)        | = Hole Inclination at Bottom               |
| CM (€/m)                | = Cost per Meter (MI)                                    | AZIMUT HOLE INCL AT BOTTOM (degree) | = Azimuth Hole Inclination at Bottom       |
| EI (€)                  | = Economic Index (MI)                                    | DRILLING TCHNO                      | = Drilling Technique                       |
| LITHS NTVL CD           | = Formation  | BIT MANUFACTURER                    | = Bit Manufacturer Code                    |

Figura 65: visualizzazione tramite *pop up* dei *MI* che compongono la battuta del *Roller Bit n.1* di Figura 64.

Analogamente a quanto indicato nella Figura 5, cliccando sui campi alfanumerici di colore azzurro (*View*) nelle colonne *BHA* e *DG* (valutazione dell'usura), si accede, tramite collegamenti ipertestuali, a due *pop up* in cui sono rappresentate la composizione della *BHA* dello scalpello ed la valutazione dell'usura secondo la codifica *IADC* (vedi figura 66).

In riferimento alla Figura 64, sotto le tabelle degli scalpelli sono presenti tre collegamenti ipertestuali che permettono di visualizzare informazioni di dettaglio in merito alle analisi riassunte nei prospetti *Roller cone* e *Fixed Cutter Bits*.

DULL Minimum Interval - Microsoft Internet Explorer

### DULL PARAMETERS

| WEAR 1 | WEAR 2 | WEAR 3 | WEAR 4 | WEAR 5 | WEAR 6 | WEAR 7 | WEAR 8 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 7      | 5      | BT     | A      | 0      | 1      | NO     | HR     |
| 7      | 5      | BT     | A      | 0      | 1      | NO     | HR     |
| 7      | 5      | BT     | A      | 0      | 1      | NO     | HR     |

Legend:

The Dull Grading System Chart adopted by IADC includes all codes necessary to dull grade roller cone bits and fixed cutter bits.

The chart describes eight factors on drill bits. The first four spaces describe the "Cutting Structure". The fifth space ("B") refers to "Bearing Seals" and does not apply to fixed cutter bits. This space is always marked with an "X" when fixed cutter bits are graded. The sixth space ("G") refers to "Gauge Measurement" while the last two "Remarks" spaces indicate "Other Dull Characteristics" (or secondary dull characteristics) and "Reason Pulled".

| T                 |                | B              |              | G               |                | REMARKS        |                   |
|-------------------|----------------|----------------|--------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|
| 1                 | 2              | 3              | 4            | 5               | 6              | 7              | 8                 |
| CUTTING STRUCTURE |                |                |              | B               | G              | REMARKS        |                   |
| Inner Rows (I)    | Outer Rows (O) | Dull Char. (D) | Location (L) | Brgng. Seal (B) | Gauge 1/16 (G) | Other Dull (O) | Reason Pulled (R) |

Figura 66: visualizzazione tramite *pop up* della valutazione dell'usura secondo la codifica IADC per il *Roller Bit n.1* di Figura 64.

Cliccando sul bottone *View IADC Code and Bit Run Parameters* si apre una finestra che indica informazioni utili per compilare la sezione scalpelli di un programma di pozzo: per la formazione e per il diametro, scelti in Figura 4, sono elencati i migliori tre codici IADC (che sono quelli da utilizzare secondo le valutazioni fatte dal Sistema di Supporto Decisionale *BPE*), i valori massimi e minimi di *WOB*, *RPM* e *Flow Rate* da utilizzare per ottimizzare le *performance* dello scalpello in pozzo (la prossima Figura 67, parte in alto). Siccome i codici IADC stanno diventando sempre meno rappresentativi degli scalpelli, si prevede di inserire, oltre ai migliori tre codici IADC, anche il vero tipo di scalpello da utilizzare (ad es. il suo nome commerciale ed eventualmente le sue caratteristiche salienti). Tali valori sono dedotti da quelli caricati sul *database FDC* e riferiti agli scalpelli elencati nelle tabelle di Figura 64.

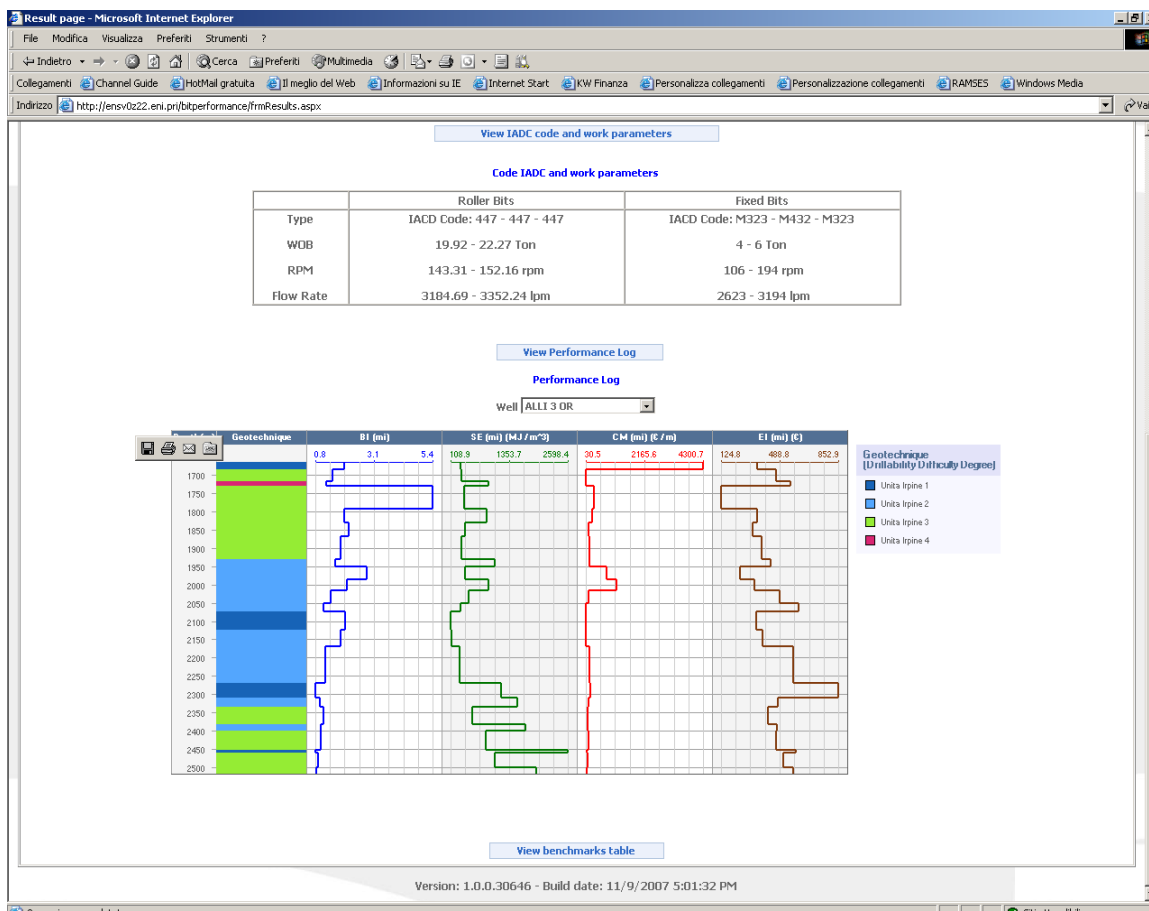


Figura 67: visualizzazione delle finestre *IADC Code and Bit Run Parameters* e *Performance Log* racchiuse nella Figura 64.

In riferimento alla Figura 67, cliccando sul bottone *View Performance Log*, si apre una finestra che indica, per ogni pozzo selezionabile in funzione della Figura 62, una serie di grafici in funzione della profondità (*Log*) che riportano i valori calcolati di *BI*, *SE*, *CM* ed *EI*, ricavati per ogni *MI*, tramite i dati raccolti nel *database FDC*. Oltre ai *Log*, in termini di profondità, è rappresentata graficamente con colori diversi, una suddivisione di ogni formazione, che riprende la classificazione geotecnica/geomeccanica contenuta nel *FDC*; essa indica la difficoltà di perforazione della formazione. La legenda dei colori è a destra del grafico. Sempre in questa schermata, cliccando il bottone *View Benchmark Table*, si apre una finestra che riporta i valori numerici dei parametri dello scalpello di riferimento (*benchmark*) utilizzati per i calcoli.

- **BIT PRE-DRILL ANALYSIS**

In base alla Figura 62, scegliendo l'opzione di *Bit Pre-Drill Analysis*, si apre la finestra indicata nella Figura 68. Questa opzione del sistema di supporto decisionale *BPE*, è stata concepita a supporto del progettista, per verificare le eventuali “proposte scalpelli” elaborate dalle varie compagnie di servizio.

The screenshot shows a web browser window titled "Pre drill Analysis - Microsoft Internet Explorer". The address bar contains the URL "http://ensv0z22.eni.pr/BRPerformance/frmPreDrillAnalysis.aspx". The page features the Eni logo in the top left corner and a navigation breadcrumb "Home > Well Planning > Pre drill Analysis". The main content area is a form with several input fields and dropdown menus. The form is organized into two rows of fields. The first row contains five dropdown menus labeled "Drill's type", "Fields", "Formation", "Bit Diameter (Inch)", and "Rig's Types". The second row contains six text input fields labeled "Depth bit trip out (m)", "WOB (metric ton)", "RPM (rpm)", "Mud Weight (g/l)", "Flow Rate (l/m)", and "TFA (sqin)". The third row contains five text input fields labeled "RDP (m/h)", "Footage", "Dull", "Torque (kgm)", and "Utensil's Cost (€)". A "Next step" button is located below the input fields. At the bottom of the page, the version information "Version: 1.0.0.30646 - Build date: 11/9/2007 5:01:32 PM" is displayed.

Figura 9: visualizzazione della finestra *Bit Pre-Drill Analysis*

L'utente del *BPE*, dopo aver scelto l'area (*Fields*), la formazione geologica (*Formation*), il diametro dello scalpello (*Bit Diameter*) ed la tipologia d'impianto di perforazione (*Rig Type*, ad es. impianto a terra, *Semisub*, etc.), deve popolare le celle della Figura 68, indicando le presunte *performance* di uno scalpello che si vorrebbe utilizzare (ad esempio, gli scalpelli consigliati dalle compagnie di servizio, le battute di prova di scalpelli di nuova tecnologia, etc.) perché possano essere comparate con le *performance* di scalpelli già classificati nel *DBC*.

Inseriti i campi richiesti, cioè i parametri necessari per il calcolo degli indici *BI*, *EI*, *CM* ed *SE*, cliccando su *Next Step*, il *BPE* genera una tabella simile a quella di Figura 63, relativa alla *Benchmark Analysis*.

Utilizzando il *database FDC* ed i parametri dello scalpello “virtuale” inserito, il *BPE* fornisce i valori di *Bit Index*, costo/metro, *Economic Index* e *Specific Energy* dei cinque migliori scalpelli tra quelli analizzati nel *database FDC* e lo scalpello virtuale inserito. Lo scalpello con il valore più alto di *Bit Index* è l’utensile verso cui il *BPE* consiglia di indirizzare la scelta come *best performer bit*.

Tutte le potenzialità del *BPE* descritte in riferimento alla *Benchmark Analysis* prima descritte, sono riportate per i risultati della *Bit Pre-Drill Analysis*.

- **POST WELL ANALYSIS**

Tornando nuovamente alla Figura 61, scegliendo l'opzione *Post Well Analysis*, si apre la finestra indicata nella figura seguente.

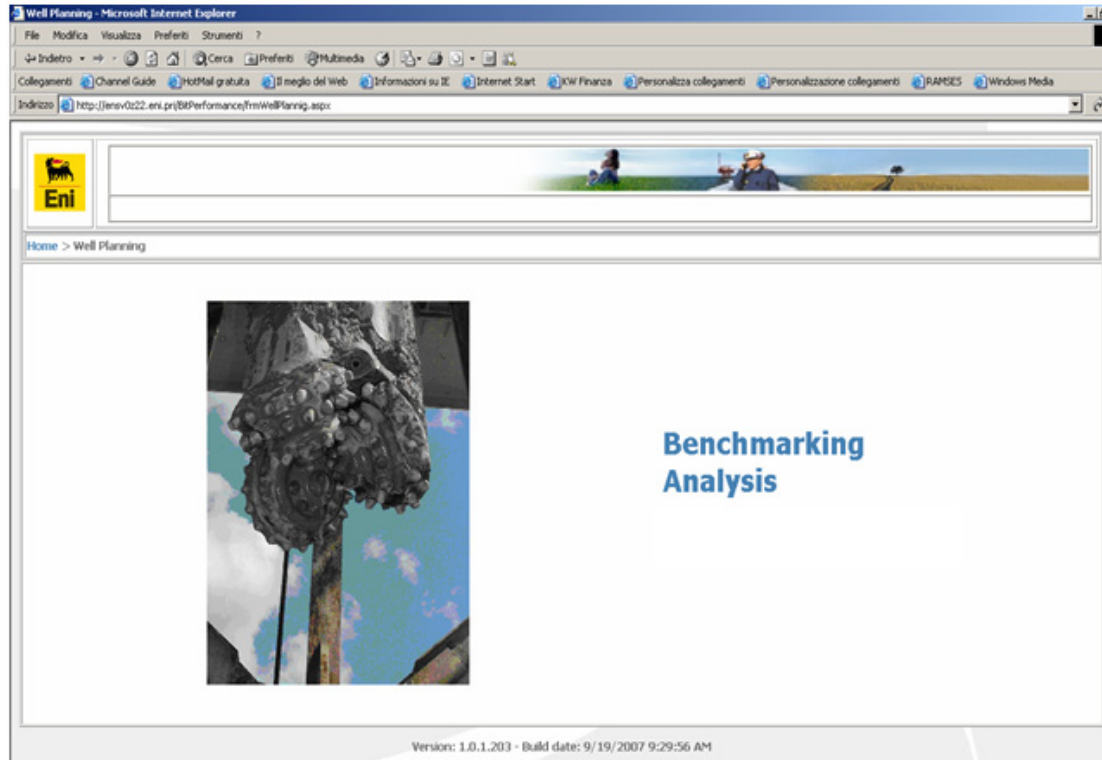


Figura 69: visualizzazione della finestra a seguito della scelta di *Post Well Analysis*.

A seguito della scelta dell'opzione *Post Well Analysis*, l'unica preferenza possibile è *Benchmarking Analysis*, le cui funzionalità sono le medesime indicate nei paragrafi precedenti (vedi Figure da 63 a 67).

## PARTE VIII: LO STUDIO DI ALCUNI CASI REALI

### 8.1 Applicazione dei modelli di perforabilità al *Formation Drillability Catalog*

All'interno del Progetto *Bit Performance* è nata la necessità di poter applicare al *FDC* ampliato (si veda la sesta parte della presente relazione) alcuni modelli di perforabilità delle formazioni per verificare la suddivisione in *minimum interval*.

Il *FDC*, nella sua stesura originale, prevede una divisione in *MI* che è costruita considerando informazioni geologiche, litologiche ed il valore dell'*ROP*. A seguito delle operazioni di ampliamento del catalogo della perforabilità delle formazioni (es. con i parametri *WOB*, *RPM*, ecc.), è scaturita la possibilità di poter calcolare anche i valori di  $\sqrt{\sigma_t}$ , *d-exp* e  $SE_M$  in base alle eq. (43), (44) e (45) rispettivamente. I modelli di perforabilità delle formazioni sopra elencati possono essere calcolati per ogni *MI* del *FDC* e, in base alla definizione di *minimum interval* [43], i valori delle eq. (43), (44) e (45) dovrebbero essere presumibilmente costanti a parità di diametro, formazione perforata e tipologia di utensile ed aumentare (quindi la perforabilità della formazione tende a diminuire) all'aumentare del carico litostatico.

Il calcolo di  $SE_M$  prevede l'uso del parametro *TVD* che non è sempre disponibile nel *FDC* (quando il pozzo è inclinato), perciò è stato sostituito con la profondità *H*, media tra il *top* ed il *bottom* del *MI*.

I calcoli di  $\sqrt{\sigma_t}$ , *d-exp* e  $SE_M$  in base alle eq. (43), (44) e (45) sono stati effettuati per i valori classificati nei *MI* dei pozzi Pozzo C, Pozzo A, Pozzo E, Pozzo E, Pozzo B, Pozzo D, Pozzo F, tutti classificati nel *Formation Drillability Catalog*.

Il primo metodo di indagine è stato quello di selezionare i *MI* identificando quelli in cui è classificata la stessa tipologia di utensili (es. scalpelli a taglienti mobili) che hanno perforato una medesima formazione (es. Unità Irpine #3, *IU3*) con lo stesso diametro.

Identificati i *MI* appartenenti a più pozzi ed a profondità simili, sono stati studiati i valori di  $\sqrt{\sigma_t}$ , *d-exp* e  $SE_M$  in base alle eq. (43), (44) e (45) con i valori di *WOB*, *RPM*, *BD* e profondità classificati nelle celle del *FDC*.



La metodologia di lavoro è rappresentata nella figura seguente.

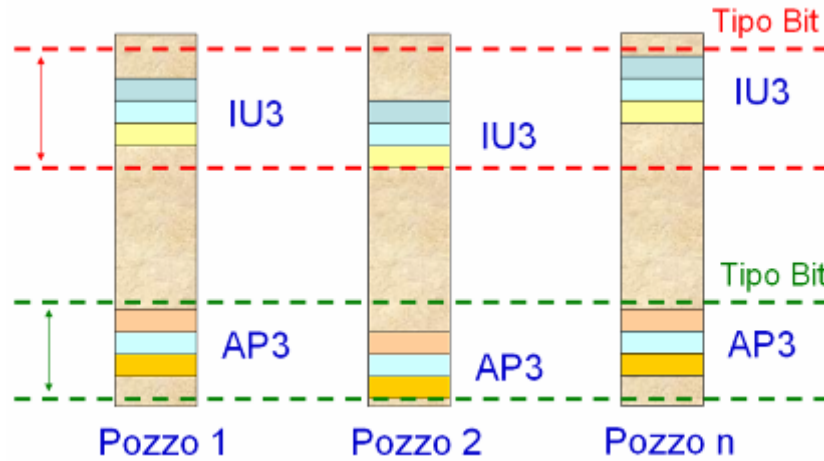


Figura 62: Metodologia di indagine sulla perforabilità delle formazioni applicata ai MI. Per il confronto tra MI, sono stati selezionati gli intervalli perforati dalla stessa tipologia di utensile, che hanno perforato la medesima formazione ed a profondità simili.

Un esempio dei risultati ottenuti per scalpelli triconici, di diametro 12-1/4" che hanno perforato le IU3 è riportato nella tabella seguente. Ogni MI è identificato da un codice numerico di quattro cifre: la prima identifica il pozzo dove il MI è stato perforato (1 rappresenta Pozzo A, 2 rappresenta Pozzo B, 5 rappresenta Pozzo E Or, 6 rappresenta Pozzo E Or A), le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del MI all'interno del singolo pozzo (es. 1051 è il MI n. 51 del pozzo Pozzo A). Ogni MI è ulteriormente identificato dal *top* e dal *bottom* in termini di profondità e dai valori calcolati di  $\sqrt{\sigma t}$ ,  $d-exp$  e  $SE_M$  in base alle eq. (43), (44) e (45).

| MI # | Pozzo   | Top MI | Bottom MI | $\sqrt{\sigma t}$ | $d-exp * 1000$ | $SE_M$ |
|------|---------|--------|-----------|-------------------|----------------|--------|
| 1047 | Pozzo A | 2335   | 2382      | 0,69              | -2,86          | 12,75  |
| 1049 | Pozzo A | 2400   | 2453      | 0,78              | -2,86          | 12,93  |
| 1051 | Pozzo A | 2461   | 2501      | 0,83              | -2,93          | 13,03  |
| 1052 | Pozzo A | 2501   | 2518      | 0,97              | -3,16          | 13,29  |
| 2038 | Pozzo A | 3028   | 3073      | 1,21              | -2,55          | 13,71  |

| MI # | Pozzo   | Top MI | Bottom MI | $\sqrt{\sigma t}$ | dc-exp *1000 | SE <sub>M</sub> |
|------|---------|--------|-----------|-------------------|--------------|-----------------|
| 5043 | Pozzo A | 3037   | 3078      | 0,84              | -2,91        | 13,05           |
| 5044 | Pozzo A | 3078   | 3225      | 0,78              | -2,70        | 12,94           |
| 5045 | Pozzo A | 3225   | 3240      | 0,83              | -3,56        | 13,23           |
| 6020 | Pozzo A | 2802   | 2819      | 1,18              | -3,47        | 13,63           |
| 6021 | Pozzo A | 2819   | 2837      | 0,97              | -3,06        | 13,30           |
| 6022 | Pozzo A | 2837   | 2879      | 1,08              | -3,31        | 13,50           |
| 6023 | Pozzo A | 2879   | 2924      | 1,04              | -3,03        | 13,42           |
| 6024 | Pozzo A | 2924   | 2945      | 1,02              | -2,83        | 13,38           |
| 6025 | Pozzo A | 2945   | 2965      | 1,06              | -2,90        | 13,46           |
| 6026 | Pozzo A | 2965   | 3012      | 1,02              | -2,83        | 13,38           |
| 6030 | Pozzo A | 3099   | 3165      | 1,14              | -2,93        | 13,62           |
| 6032 | Pozzo A | 3210   | 3218      | 1,09              | -3,02        | 13,59           |

Tabella 2: Valori di  $\sqrt{\sigma t}$ ,  $d-exp$  e  $SE_M$  calcolati per un insieme di  $MI$  in cui sono classificati scalpelli triconici, di diametro 12-1/4” che hanno perforato la formazione  $IU3$ . I  $MI$  sono elencati in termini di profondità crescenti.

Ricordando che tutti i  $MI$  elencati nella tabella precedente fanno riferimento a scalpelli triconici, di diametro 12-1/4” che hanno perforato la formazione  $IU3$ , i  $MI$  n. 1047 e 1049 che sono praticamente contigui, hanno valori simili di  $\sqrt{\sigma t}$ ,  $d-exp$  e  $SE_M$ , come i  $MI$  n. 1051 e 1052. I valori di  $\sqrt{\sigma t}$ ,  $d-exp$  e  $SE_M$  aumentano dal  $MI$  n. 1047 al 1052, come aumenta la profondità a cui i  $MI$  sono stati identificati.

Una piccola anomalia riferita all’aumento del valore di  $SE_M$  con la profondità è riscontrabile nel  $MI$  n. 5044 rispetto ai  $MI$  n. 5043 e 5045, mentre il valore di  $\sqrt{\sigma t}$  presenta un *trend* in aumento. Il valore di  $d-exp$  ha un calo nel  $MI$  n. 5045.

Considerazioni simili possono essere fatte anche sui  $MI$  del pozzo Pozzo E Or A.

Nei  $MI$  da n. 6024 a 6026 il valore di  $SE_M$  si è mantenuto pressoché costante: questo significa che lo è anche stata la combinazione di  $WOB$ ,  $RPM$  ed  $ROP$  (perché  $BD$  è costante e la profondità può essere considerata tale). In questo modo  $SE_M$  potrebbe rappresentare una nuova chiave di lettura riguardo l’ottimizzazione dei parametri  $WOB$  ed  $RPM$  (decisi dall’operatore) rispetto ad  $ROP$ . Una variazione del valore di  $SE_M$

potrebbe rappresentare, a parità di formazione perforata e di *ROP*, una variazione di *WOB* ed *RPM*: quando  $SE_M$  aumenta la coppia di valori *WOB* ed *RPM* non è più ottimale.

In linea generale, analizzando ulteriori formazioni geologiche, scalpelli di diversa tipologia e con diametri differenti si deduce che la divisione in *MI*, implementata nel *FDC* prima del suo ampliamento anche con i parametri che permettono il calcolo di  $\sqrt{\sigma_t}$ , *d-exp* e  $SE_M$  in base alle eq. (43), (44) e (45) può considerarsi generalmente valida a seguito dell'applicazioni dei modelli di perforabilità delle formazioni elencati precedentemente.

Un'ulteriore indagine è stata condotta analizzando i valori medi che i parametri  $\sqrt{\sigma_t}$ , *d-exp* e  $SE_M$  presentano per tutti i *MI* in cui è classificata la stessa tipologia di scalpello, con il medesimo diametro e che si riferiscono alla stessa formazione geologica perforata nei pozzi Pozzo A, Pozzo C, Pozzo E, Pozzo E Or A e Pozzo B.

La tabella seguente identifica, ordinati per fasi di perforazione decrescenti i valori di  $\sqrt{\sigma_t}$ , *d-exp* e  $SE_M$  associati all'acronimo delle formazioni perforate (*FG* rappresenta il *Flysch* Galestrino, *CS* i Calcari con Selce, *IU* le Unità Iripine, *MF* la formazione di Monte Facito, *SS* gli Scisti Silicei ed *AP* la Piattaforma Apula, tutte identificate dal numero della sottoclasse corrispondente), al numero di *MI* che sono stati analizzati ed alla tipologia di scalpello classificato (*R* rappresenta gli scalpelli a taglienti mobili e *F* quelli a taglienti fissi).

| Fase  | Formazione | Tipo di Bit | Numero di MI | $\sqrt{\sigma_t}$ | dc-exp<br>*1000 | $SE_M$ |
|-------|------------|-------------|--------------|-------------------|-----------------|--------|
| 17,50 | FG5        | F           | 1            | 0,16              | -5,14           | 10,78  |
| 17,50 | CS1        | R           | 1            | 0,45              | -4,28           | 12,05  |
| 17,50 | CS2        | R           | 9            | 0,52              | -3,68           | 12,19  |
| 17,50 | FG3        | R           | 7            | 0,51              | -3,18           | 11,96  |
| 17,50 | FG4        | R           | 5            | 0,87              | -3,60           | 11,80  |
| 17,50 | FG5        | R           | 2            | 0,40              | -4,25           | 11,70  |
| 17,50 | SS1        | R           | 1            | 0,32              | -4,57           | 11,62  |
| 16,00 | UI1        | F           | 1            | 0,28              | -4,03           | 11,63  |
| 16,00 | UI3        | F           | 5            | 0,28              | -4,72           | 11,67  |
| 16,00 | CS4        | R           | 2            | 0,34              | -3,63           | 11,63  |
| 16,00 | MF1        | R           | 1            | 1,03              | -3,65           | 13,09  |

| Fase  | Formazione | Tipo di Bit | Numero di MI | $\sqrt{\sigma t}$ | dc-exp<br>*1000 | SE <sub>M</sub> |
|-------|------------|-------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| 16,00 | MF2        | R           | 1            | 0,67              | -3,54           | 12,53           |
| 16,00 | SS3        | R           | 2            | 0,25              | -4,06           | 11,23           |
| 16,00 | UI3        | R           | 9            | 0,69              | -3,42           | 12,59           |
| 14,75 | CS2        | R           | 4            | 0,71              | -3,45           | 12,63           |
| 14,75 | CS4        | R           | 2            | 0,77              | -3,33           | 12,74           |
| 14,75 | FG3        | R           | 3            | 0,70              | -2,89           | 12,60           |
| 14,75 | FG4        | R           | 5            | 0,78              | -2,93           | 12,83           |
| 14,75 | FG5        | R           | 5            | 0,82              | -3,15           | 12,93           |
| 14,75 | UI3        | R           | 6            | 0,74              | -3,22           | 12,91           |
| 12,25 | PA3        | F           | 5            | 0,63              | -3,16           | 12,93           |
| 12,25 | PA6        | F           | 3            | 0,83              | -3,79           | 13,38           |
| 12,25 | UI1        | F           | 4            | 0,56              | -3,80           | 12,62           |
| 12,25 | UI2        | F           | 7            | 0,52              | -3,36           | 12,55           |
| 12,25 | UI3        | F           | 25           | 0,58              | -3,28           | 12,24           |
| 12,25 | UI4        | F           | 1            | 0,72              | -3,51           | 12,82           |
| 12,25 | CS1        | R           | 9            | 1,04              | -3,56           | 13,37           |
| 12,25 | CS2        | R           | 22           | 1,05              | -3,38           | 13,35           |
| 12,25 | CS4        | R           | 5            | 0,90              | -3,72           | 13,15           |
| 12,25 | FG3        | R           | 2            | 0,82              | -2,90           | 13,00           |
| 12,25 | PA2        | R           | 1            | 1,18              | -2,67           | 13,62           |
| 12,25 | PA3        | R           | 1            | 1,03              | -2,72           | 13,44           |
| 12,25 | PA4        | R           | 1            | 0,77              | -2,15           | 12,31           |
| 12,25 | PA6        | R           | 4            | 1,17              | -2,78           | 13,62           |
| 12,25 | PA7        | R           | 2            | 1,44              | -2,79           | 13,98           |
| 12,25 | SS2        | R           | 3            | 0,93              | -3,44           | 13,20           |
| 12,25 | UI1        | R           | 2            | 1,14              | -2,96           | 13,58           |
| 12,25 | UI2        | R           | 2            | 0,90              | -3,33           | 13,20           |
| 12,25 | UI3        | R           | 20           | 0,98              | -2,96           | 13,32           |
| 8,50  | PA1        | F           | 6            | 1,42              | -5,57           | 14,20           |
| 8,50  | PA3        | F           | 18           | 1,12              | -4,93           | 13,75           |
| 8,50  | PA1        | R           | 8            | 1,05              | -3,79           | 13,62           |
| 8,50  | PA2        | R           | 2            | 1,27              | -4,05           | 13,81           |
| 8,50  | PA3        | R           | 18           | 1,06              | -3,68           | 13,49           |
| 8,50  | PA4        | R           | 2            | 0,98              | -3,97           | 13,42           |
| 8,50  | PA5        | R           | 4            | 1,19              | -3,72           | 13,65           |
| 8,50  | PA7        | R           | 1            | 1,46              | -3,75           | 13,97           |
| 6,00  | PA2        | F           | 1            | 0,76              | -4,78           | 13,37           |
| 6,00  | PA3        | F           | 9            | 0,32              | -4,27           | 13,44           |
| 6,00  | PA4        | F           | 2            | 0,91              | -4,27           | 13,48           |
| 6,00  | PA5        | F           | 2            | 0,80              | -4,03           | 13,27           |
| 6,00  | PA7        | F           | 4            | 0,90              | -4,24           | 13,45           |
| 6,00  | PA3        | R           | 72           | 0,89              | -4,22           | 13,41           |

Tabella 3: Valori di  $\sqrt{\sigma_t}$ ,  $d-exp$  e  $SE_M$  calcolati per i MI dei pozzi Pozzo A, Pozzo C, Pozzo E, Pozzo E Or A e Pozzo B. Sono rappresentati le fasi in ordine decrescente, l'acronimo delle formazioni perforate ( $FG$  rappresenta il *Flysch* Galestrino,  $CS$  i Calcari con Selce,  $IU$  le Unità Iripine,  $MF$  la formazione di Monte Facito,  $SS$  gli Scisti Silicei ed  $AP$  la Piattaforma Apula, tutte identificate dal numero della sottoclasse corrispondente), il tipo di scalpello ( $R$  rappresenta gli scalpelli triconici e  $F$  quelli a taglienti fissi) ed il numero di  $MI$  che sono stati analizzati.

Si nota come, al diminuire del diametro dello scalpello, i valori di  $SE_M$  tendano ad aumentare, mentre quelli di  $\sqrt{\sigma_t}$ ,  $d-exp$  aumentano in modo differente e presentano un andamento oscillante nelle fasi 8-1/2" e 6".

L'aumento dei valori di  $\sqrt{\sigma_t}$ ,  $d-exp$  e  $SE_M$  sembra sintomatico di una diminuzione delle caratteristiche di perforabilità delle formazioni.

Questa indicazione potrebbe rappresentare una valutazione anche sull'attendibilità dei tre indici:  $SE_M$  ha un comportamento differente rispetto a  $\sqrt{\sigma_t}$ ,  $d-exp$ , presumibilmente perchè non è definito in modo empirico, tiene conto della profondità (elemento importante ai fini della valutazione della perforabilità delle formazioni) ed ha un intervallo di valori più ampio rispetto agli altri due.

Oltre ad evidenziare quanto descritto sopra, l'analisi in questione permette di apprezzare come, a parità di formazione perforata e tipologia di scalpello utilizzato, variano i valori di  $\sqrt{\sigma_t}$ ,  $d-exp$  e  $SE_M$  in funzione dei diametri degli scalpelli.

Le tabelle seguenti hanno la stessa struttura della precedente, ma i risultati mostrati sono suddivisi per formazione perforata.

| Fase    | Formazione | Tipo di Bit | Numero di MI | $\sqrt{\sigma_t}$ | $d-exp$<br>*1000 | $SE_M$ |
|---------|------------|-------------|--------------|-------------------|------------------|--------|
| 17-1/2" | CS2        | R           | 9            | 0,52              | -3,68            | 12,19  |
| 14-3/4" | CS2        | R           | 4            | 0,71              | -3,45            | 12,63  |

Tabella 4a

| Fase    | Formazione | Tipo di Bit | Numero di MI | $\sqrt{\sigma}$ | $dc-exp$<br>*1000 | $SE_M$ |
|---------|------------|-------------|--------------|-----------------|-------------------|--------|
| 17-1/2" | FG3        | R           | 7            | 0,51            | -3,18             | 11,96  |
| 14-3/4" | FG3        | R           | 3            | 0,70            | -2,89             | 12,60  |
| 12-1/4" | FG3        | R           | 2            | 0,82            | -2,90             | 13,00  |

Tabella 4b

| Fase    | Formazione | Tipo di Bit | Numero di MI | $\sqrt{\sigma}$ | $dc-exp$<br>*1000 | $SE_M$ |
|---------|------------|-------------|--------------|-----------------|-------------------|--------|
| 16"     | UI3        | R           | 9            | 0,69            | -3,42             | 12,59  |
| 12-1/4" | UI3        | R           | 20           | 0,98            | -2,96             | 13,32  |
| 12-1/4" | UI3        | F           | 25           | 0,58            | -3,28             | 12,24  |

Tabella 4c

| Fase    | Formazione | Tipo di Bit | Numero di MI | $\sqrt{\sigma}$ | $dc-exp$<br>*1000 | $SE_M$ |
|---------|------------|-------------|--------------|-----------------|-------------------|--------|
| 12-1/4" | PA3        | R           | 1            | 1,03            | -2,72             | 13,44  |
| 8-1/2"  | PA3        | R           | 18           | 1,06            | -3,68             | 13,49  |
| 6"      | PA3        | R           | 72           | 0,89            | -4,22             | 13,41  |

Tabella 4d

| Fase    | Formazione | Tipo di Bit | Numero di MI | $\sqrt{\sigma}$ | $dc-exp$<br>*1000 | $SE_M$ |
|---------|------------|-------------|--------------|-----------------|-------------------|--------|
| 12-1/4" | PA3        | F           | 5            | 0,63            | -3,16             | 12,93  |
| 8-1/2"  | PA3        | F           | 18           | 1,12            | -4,93             | 13,75  |
| 6"      | PA3        | F           | 9            | 0,32            | -4,27             | 13,44  |

Tabella 4e

Tabelle da 4a a 4e: Valori di  $\sqrt{\sigma}$ ,  $d-exp$  e  $SE_M$  calcolati per i MI dei pozzi Pozzo A, Pozzo C, Pozzo E, Pozzo E Or A e Pozzo B. Sono rappresentati, a parità di formazione geologica perforata (FG rappresenta il *Flysch* Galestrino, CS i Calcari con Selce, IU le Unità Iprine ed AP la Piattaforma Apula, tutte identificate dal numero della sottoclasse corrispondente), le fasi in ordine decrescente, il tipo di scalpello (R rappresenta gli scalpelli triconici e F quelli a taglienti fissi) ed il numero di MI che sono stati analizzati.

Dalla tabella 4a si nota che la formazione Calcari con Selce #2 (CS2) risulta più perforabile da scalpelli triconici con il diametro di 17-1/2" rispetto al 14-3/4" perchè il valore di  $SE_M$  è più alto per la seconda fase rispetto alla prima.

Un'informazione simile è contenuta nella tabella 4b per la formazione geologica *Flysch Galestrino #3*, ed il ragionamento può essere esteso anche al diametro 12-1/4", a cui è riferito il valore più basso della perforabilità.

Nella tabella 4c sono classificati due tipologie di utensili (a taglienti fissi *F* ed a taglienti mobili *R*) e si nota come la formazione delle Unità Irpine #3 sia meglio perforabile con uno scalpello a taglienti fissi ( $SE_M = 12,24$ ) rispetto ad un utensile a taglienti mobili ( $SE_M = 13,32$ ). Questa potrebbe rappresentare un'ulteriore informazione da trarre dall'analisi del *FDC* con il modello di perforabilità delle formazioni denominato  $SE_M$ , in quanto è intuibile che anche l'utensile che perfora una formazione può essere più o meno adatto alla stessa.

Le tabelle 4d e 4e sono significative perchè riguardano la stessa formazione geologica (Piattaforma Apula #3) ma perforata con scalpelli a taglienti mobili nella tabella 4d e perforata con scalpelli a taglienti fissi nella tabella 4c. La fase da 12-1/4" è meglio perforabile con un *fixed cutter* rispetto ad un *rolling cutter* ( $SE_M = 12,93$  e  $SE_M = 13,44$  rispettivamente), il discorso inverso vale per la fase 8-1/2".

Analisi simili a quelle presentate nelle tabelle da 3 a 4e hanno permesso di testare sia i *MI* del *FDC*, identificando nel catalogo uno strumento prezioso per il Progetto di ricerca, ma anche di sviluppare un nuovo indice di perforabilità delle formazioni che, permette di trarre un ulteriore valore aggiunto dal *FDC* ampliato per lo studio delle *performance* degli scalpelli.

In ultima analisi è possibile calcolare il valore di  $SE_M$  anche direttamente dai dati di *WOB*, *RPM*, *BD*, *TVD* rilevati dalla compagnia di *Mud Logging*.

Il primo pozzo analizzato è stato Pozzo A ed il risultato della curva di  $SE_M$  in funzione della profondità è rappresentato nella figura seguente. Si nota che il valore di  $SE_M$  aumenta con la profondità, in modo più repentino nei primi cinquecento metri di foro, in maniera oscillante fino alla Piattaforma Apula, per poi assestarsi intorno al valore di 13,5. Nella figura seguente sono identificati anche i *top* delle principali formazioni geologiche attraversate dalla perforazione: Piattaforma Appenninica, Unità Irpine e Piattaforma Apula. Il grafico di  $SE_M$  ha delle piccole anomalie rappresentate da valori

puntuali bassi o alti rispetto all'andamento generale. In alcuni casi queste anomalie sono legati ad errori nei dati registrati nei rapporti della compagnia di *mud-logging* (WOB, RPM, ecc.) in altri a variazioni repentine degli stessi, legate probabilmente a decisioni dell'operatore.

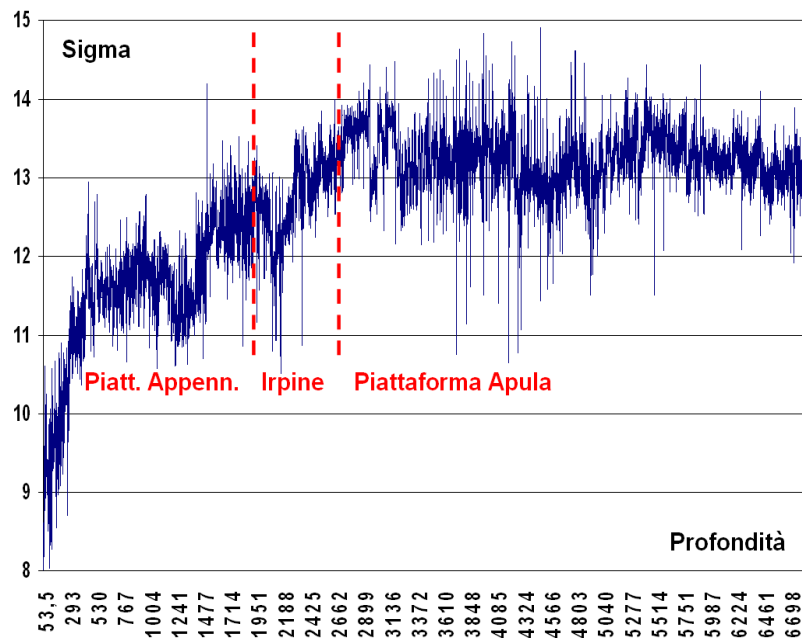


Figura 63: andamento di  $SE_M$  in base profondità nel pozzo Pozzo A. Oltre al grafico di  $SE_M$  sono identificati i *top* delle principali formazioni geologiche attraversate durante la perforazione.

Lo scopo del calcolo di  $SE_M$  con una frequenza elevata di valori ha anche lo scopo di paragonare l'andamento della sua curva con le divisioni in *MI* che Pozzo A presenta nel FDC. La figura seguente mostra, a titolo di esempio, la fase 12-1/4" del pozzo Pozzo A dov'è rappresentato l'andamento di  $SE_M$  in base alla profondità insieme con un'indicazione puramente rappresentativa della divisione in *MI* del FDC (la linea spezzata). L'obiettivo è quello di verificare se la divisione in *MI* identifica delle variazioni nell'andamento di  $SE_M$ . nel pozzo Pozzo A l'andamento di  $SE_M$  è generalmente corrispondente con la divisione in *MI* del FDC.



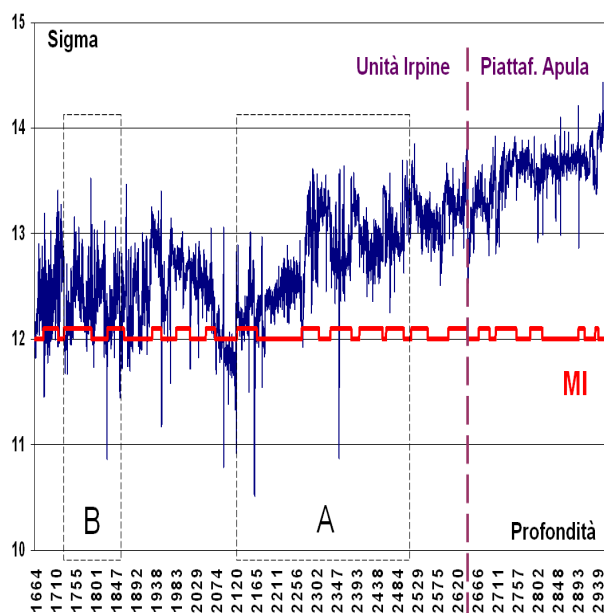


Figura 64: andamento di  $SE_M$  in base profondità nella fase 12-1/4" del pozzo Pozzo A. Oltre al grafico di  $SE_M$  è identificata una linea spezzata che, a titolo puramente esemplificativo, identifica le divisione in  $MI$  del  $FDC$ . Le due zone ( $A$  e  $B$ ) indicano una maggiore ed una minore corrispondenza tra la divisione in  $MI$  ed  $SE_M$ .

Un'analisi simile a quella rappresentata nella figura precedente, è fatta anche per i pozzi Pozzo B, Pozzo C, Pozzo E Or e Pozzo Aed è rappresentata nella figura seguente dove, oltre al grafico di  $SE_M$ , sono identificati i top delle principali formazioni geologiche attraversate durante la perforazione ( $FG$  rappresenta il *Flysch* Galestrino,  $CS$  i calcari con Selce,  $IU$  le Unità Irpine,  $PA$  la Piattaforma Apula). Anche in questo caso, come per il pozzo Pozzo A, si riscontra un andamento crescente di  $SE_M$ , che dovrebbe indicare una diminuzione della perforabilità della roccia.

I modelli di perforabilità delle formazioni applicati al  $FDC$  ed ai dati rilevati dalle compagnie di *Mud Logging* hanno permesso di studiare, con strumenti differenti da quelli utilizzati per identificarla, la divisione in  $MI$  del  $FDC$ . In linea generale, per i pozzi analizzati ed in base alle descrizioni precedenti si può affermare che i  $MI$  del  $FDC$  sono funzionali alla valutazione delle *performance* degli scalpelli di perforazione, per

cui il *FDC* è un prezioso strumento per il Progetto di ricerca e sviluppo *Bit Performance*.

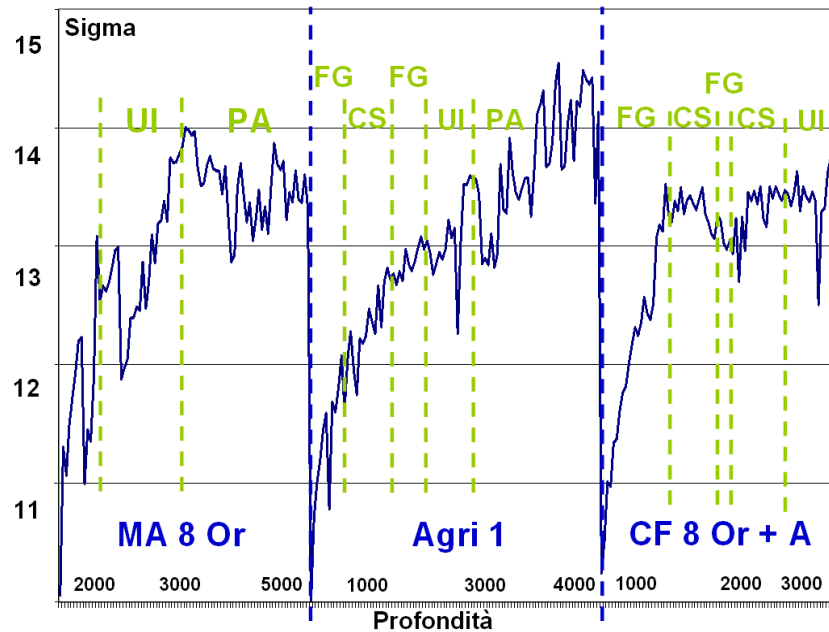


Figura 65: andamento di  $SE_M$  in base profondità per i pozzi Pozzo B, Pozzo C, Pozzo E Or ed 8 Or A. Oltre al grafico di  $SE_M$  sono identificati i top delle formazioni attraversate durante la perforazione (*FG* rappresenta il *Flysch Galestrino*, *CS* i calcari con Selce, *IU* le Unità Irpine, *PA* la Piattaforma Apula).

## 8.2 Prime applicazioni del *Bit Index*, dell'*Economic Index*, della *Specific Energy* e del costo/metro al *Formation Drillability Catalog*

Una prima valutazione dell'attendibilità del *BI* è fatta utilizzando i dati di tre pozzi profondi recentemente perforati in Val d'Agri [35,37]: Pozzo E Or, Pozzo B, Pozzo H(vedi tabella seguente).

| Nome del pozzo | Intervalli analizzati |        | Sezioni                   | Profilo | Formazioni |
|----------------|-----------------------|--------|---------------------------|---------|------------|
|                | Top                   | Bottom |                           |         |            |
| Pozzo A        | 360                   | 3240   | 17-1/2", 14-3/4", 12-1/4" | V       | FL, CS, UI |
| Pozzo B        | 354                   | 5367   | 16", 12-1/4", 8-1/2", 6"  | V, I, O | UI, AP     |
| Pozzo H        | 3212                  | 4520   | 5-7/8"                    | V, O    | AP         |

Tabella 5: Elementi caratterizzanti i pozzi in analisi. *V*, *I* e *O* indicano il profilo del pozzo Verticale, Inclinato ed Orizzontale. Gli acronimi delle formazioni sono i seguenti: *Flysch* Galestrino (*FL*), Calcare con Selce (*CS*), Unità Iripine (*UI*), Piattaforma Apula (*AP*).

Sul *FDC* dei tre pozzi in esame, sono svolte alcune operazioni di raggruppamento dei *MI* e di completamento dei parametri necessari al calcolo del *Bit index*.

I *MI* sono raggruppati secondo tre criteri: (1) *MI* che appartengono alla medesima formazione (es. *AP#3*), (2) *MI* adiacenti in termini di profondità (es. l'intervallo da 3403 m a 3413 m e l'intervallo da 3413 m a 3419 m), (3) *MI* riferiti alla medesima battuta dello stesso scalpello (si veda la tabella 5).

In questo modo, si sono ottenuti degli "intervalli geotecnici omogenei" (*IGO*) [35,37]: questa operazione di raggruppamento è pensata per frazionare il meno possibile le battute dei singoli utensili.

Il raggruppamento è possibile perché tra due o più *MI* appartenenti alla stessa formazione, adiacenti in termini di profondità e riferiti alla medesima battuta dello stesso scalpello, tutte le condizioni che definiscono il *MI* dovrebbero essere uguali tranne il parametro *ROP* che, quindi, è stata nuovamente calcolata in funzione dell'*IGO*.

Il calcolo del *BI* è fatto utilizzando utensili della stessa tipologia, con lo stesso diametro e che abbiano perforato la stessa formazione, classificati in differenti "intervalli geotecnici omogenei".

| <b>MI</b> | <b>Fase</b> | <b>Formazione</b> | <b>IADC</b> | <b>Top</b> | <b>Bottom</b> |
|-----------|-------------|-------------------|-------------|------------|---------------|
| 1         | 8-1/2"      | FM #3             | 517         | 3373       | 3403          |
| 2         | 8-1/2"      | FM #1             | 517         | 3403       | 3413          |
| 3         | 8-1/2"      | FM #1             | 517         | 3413       | 3419          |
| 4         | 8-1/2"      | FM #3             | 517         | 3419       | 3426          |
| 5         | 8-1/2"      | FM #1             | 517         | 3426       | 3468          |

| <b>IGO</b> | <b>Fase</b> | <b>Formazione</b> | <b>IADC</b> | <b>Top</b> | <b>Bottom</b> |
|------------|-------------|-------------------|-------------|------------|---------------|
| 1          | 8-1/2"      | FM #3             | 517         | 3373       | 3403          |
| 2+3        | 8-1/2"      | FM #1             | 517         | 3403       | 3419          |
| 4          | 8-1/2"      | FM #3             | 517         | 3419       | 3426          |
| 5          | 8-1/2"      | FM #1             | 517         | 3426       | 3468          |

Tabella 6: esempio di raggruppamento dei MI all'interno del singolo pozzo. La classificazione del *FDC* divide la battuta in 5 differenti *MI* (tabella sopra). In questo caso è possibile raggruppare il *MI#2* e *#3* perché appartengono alla medesima formazione (*FM#1*), sono successivi in termini di profondità e sono riferiti alla medesima battuta dello stesso scalpello. Questo raggruppamento definisce l'*IGO 2+3* (tabella sotto).

Nella Tabella 6 è riportata una "visione d'insieme" dei tre pozzi scelti per testare il *BI* applicato al *FDC*, a seguito dell'operazione di raggruppamento dei *MI*, per identificare gli *IGO*.

Nella tabella 7 sono riportati il numero totale degli scalpelli classificati nei vari *IGO* considerati in questa prima analisi, divisi per diametro, profilo di pozzo e formazione perforata.

| <b>Pozzo</b> | <b>Profilo</b> | <b>Fase</b> | <b>Formazioni</b> |            |            |            |            |            |            |
|--------------|----------------|-------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|              |                |             | <b>FL3</b>        | <b>FL4</b> | <b>CS2</b> | <b>UI3</b> | <b>AP3</b> | <b>AP4</b> | <b>AP5</b> |
| CF 8 Or      | V              | 17-1/2"     | 3T                | 3T         |            |            |            |            |            |
| CF 8 Or      | V              | 14-3/4"     | 3T                | 2T         |            |            |            |            |            |
| CF 8 Or      | V              | 12-1/4"     | 1T                |            | 13T        | 2T         |            |            |            |
| MA 8 Or      | I              | 16"         |                   |            |            | 2T         |            |            |            |
| MA 8 Or      | I              | 12-1/4"     |                   |            |            | 5P + 1T    |            |            | 1T         |
| MA 8 Or      | I              | 8-1/2"      |                   |            |            |            | 2T         | 1T         | 3T         |
| MA 8 Or      | I              | 8-1/2"      |                   |            |            |            | 6T         |            |            |
| MA 8 Or      | O              | 6"          |                   |            |            | 1P         | 3P         | 2P         | 6P         |
| MA 8 Or      | V              | 5-7/8"      |                   |            |            |            | 2T         |            |            |
| MA N1 OrA    | I              | 5-7/8"      |                   |            |            |            | 10T + 4P   |            |            |
| MA N1 OrA    | O              | 5-7/8"      |                   |            |            |            | 1T + 3P    |            |            |

Tabella 7. numero totale degli scalpelli classificati nei vari *IGO* considerati in questa prima analisi, divisi per diametro, profilo di pozzo e formazione perforata. *T* e *P* indicano scalpelli triconici e scalpelli a taglienti fissi, rispettivamente.

In riferimento alla precedente tabella, nel pozzo Pozzo E Or la maggior parte degli scalpelli sono classificati nel *Flysch* Galestrino #3 e #4, in fasi da 17-1/2" e 14-3/4". Nel pozzo Pozzo B, la maggior parte degli scalpelli è classificata nelle Unità Irpine (fase da 12-1/4") e nella Piattaforma Apula (fase da 8-1/2"). Nel pozzo Pozzo H è stata considerata solamente la fase da 5-7/8", perforata nella Piattaforma Apula.

All'interno delle Unità Irpine è stato possibile paragonare l'andamento degli scalpelli sia nel pozzo Pozzo E Or che nel pozzo Pozzo B, nella Piattaforma Apula è stato possibile lavorare nei pozzi Pozzo B e Pozzo H, nel *Flysch* Galestrino, solamente nel pozzo Pozzo E.

In seguito all'operazione di raggruppamento si è ampliato il *FDC* ed ogni nuovo dato inserito è riferito all'*IGO*: le informazioni riguardo *WOB*, *RPM*, *FR* e *TQ* sono inserite come media calcolata dei valori registrati in continuo, su base profondità, in funzione dello spessore dell'*IGO*. Il *MW* è calcolato come media tra quello al *top* e quello al *bottom* dell'*IGO*, *TFA*,  $DG_1$  e  $DG_2$  per il calcolo di *DG*, sono dedotti dal *bit record*. I valori  $DG_1$  e  $DG_2$  sono registrati al termine della battuta dello scalpello, perciò è necessario compiere le seguenti operazioni per adattare il calcolo di *DG* all'*IGO*: si calcola il valore *DG* tramite l'eq. (35) utilizzando i valori  $DG_1$  e  $DG_2$  dedotti dal *bit record*; in questo modo si ottiene il valore dell'usura sull'intera battuta. In seguito, si normalizza tale valore sulle ore di perforazione degli *IGO*, utilizzando le eq. (39), (40), (41), "sostituendo" al concetto di *MI* quello di *IGO*.

Per il calcolo del *Bit Index* dei vari scalpelli di cui si vogliono investigare le *performance*, è utilizzata una formulazione del *Bit Index* indicata nell'eq. (36), che considera come variabili indipendenti *WOB*, *RPM*, *Q*, *HSI* (potenza idraulica per pollice di diametro), e come dipendenti *ROP*, *TQ*, *H*, *DG*.

Per ogni insieme di utensili della stessa tipologia e che perforano la medesima formazione, ne è stato preso uno come riferimento e, ad esso, è assegnato il valore *Bit Index* unitario. In questo modo i valori dei *BI*, calcolati per gli scalpelli di cui si vogliono investigare le *performance*, sono riferiti ai valori dei parametri dello scalpello di riferimento, non rappresentano un valore assoluto, e sono ordinabili per cercare d'identificare l'utensile che ha ottenuto le migliori *performance* (cioè possiede il valore

di  $BI$  più alto). In linea generale, cambiando l'utensile di riferimento, i valori assoluti dei  $BI$  degli scalpelli di cui si vogliono investigare le *performance* cambiano, ma non cambia lo scalpello con il valore più alto di  $BI$ . In questa prima analisi sono stati scelti come riferimento degli scalpelli in modo che i  $BI$  calcolati fossero tutti maggiori di uno (es. lo scalpello di riferimento era quello con le peggiori *performance* in termini di  $ROP$  ed  $H$ ) [35,37].

Le costanti parametriche  $C_j$  assegnate ad ogni variabile dipendente, sono state scelte in accordo con gli scenari di perforazione entro cui lavorano gli scalpelli. Per tutti i confronti sono stati utilizzati i seguenti valori:  $C_{ROP} = 0.5$ ,  $C_H = 0.3$ ,  $C_{TQ} = 0.1$ ,  $C_{DG} = 0.1$ .

Per il calcolo del  $BI$  è stato compilato ed utilizzato un foglio commerciale, riportato nella tabella seguente.

| <b>Dati per il calcolo del Bit Index (utilizzando le equazioni del Drilling Index)</b>                                      |                          |                          |  |                        |                          |                          |      |
|---|--------------------------|--------------------------|--|------------------------|--------------------------|--------------------------|------|
| Variabili indipendenti  | Scalpello di riferimento | Scalpello da investigare |  | Variabili dipendenti   | Scalpello di riferimento | Scalpello da investigare | Pesi |
| WOB   | 26                       | 22                       |  | ROP                    | 15                       | 20                       | 0.50 |
| RPM   | 136                      | 152                      |  | TQ                     | 12                       | 15                       | 0.10 |
| HSI   | 60                       | 177                      |  | H                      | 80                       | 240                      | 0.30 |
| Q   | 3371                     | 3777                     |  | DG                     | 0.17                     | 0.50                     | 0.10 |
| <b>Valori delle variabili dipendenti dello scalpello da investigare, sotto le condizioni dello scalpello di riferimento</b> |                          |                          |  |                        |                          |                          |      |
| $ROP_{z,WOB} =$<br>23.64  | $ROP_{z,RPM} =$<br>17.89 | $ROP_{z,HSI} =$<br>6.78  |  | $ROP_{z,Q} =$<br>17.85 |                          | $ROP_{z,r} =$<br>16.54   |      |
| $TQ_{z,WOB} =$<br>0.08  | $TQ_{z,RPM} =$<br>0.06   | $TQ_{z,HSI} =$<br>0.02   |  | $TQ_{z,Q} =$<br>0.06   |                          | $TQ_{z,r} =$<br>0.06     |      |
| $H_{z,WOB} =$<br>283.64   | $H_{z,RPM} =$<br>214.74  | $H_{z,HSI} =$<br>81.36   |  | $H_{z,Q} =$<br>214.20  |                          | $H_{z,r} =$<br>198.48    |      |
| $DG_{z,WOB} =$<br>0.59  | $DG_{z,RPM} =$<br>0.45   | $DG_{z,HSI} =$<br>0.17   |  | $DG_{z,Q} =$<br>0.45   |                          | $DG_{z,r} =$<br>0.41     |      |
| <b>BI dello scalpello di riferimento = 1.00 - BI dello scalpello da investigare = 1.61</b>                                  |                          |                          |  |                        |                          |                          |      |

Tabella 8: calcolo del  $BI$ , tramite le equazioni della metodologia del Drilling Index [16]

La tabella successiva riporta i risultati dell'analisi tramite  $BI$ ; l'identificazione degli scalpelli che hanno presumibilmente registrato le migliori *performance* è fatta tramite il codice  $IADC$  [35].

| Scalpellini con le migliori performance | Formazioni |      |      |      |      |      |      |
|---|------------|------|------|------|------|------|------|
|   | FL3        | FL4  | CS2  | UI3  | AP3  | AP4  | AP5  |
| Triconici                               | 435M       | 425M | 515M | 517X | 517X |      | 517X |
| Taglienti fissi                         |            |      |      | M221 | M422 | M422 | M422 |

Tabella 9. Risultati dell'analisi tramite *Bit Index* per gli *IGO* dei pozzi Pozzo E Or, Pozzo B e Pozzo C. Per ogni formazione, la tabella riporta il codice *IADC* dello scalpello a cui corrisponde il *BI* maggiore, che è quindi considerato quello con le migliori performance.

Per il pozzo Pozzo E Or, l'andamento grafico della distribuzione del valore del *BI*, calcolato in base alla fase, è riportato nella figura seguente.

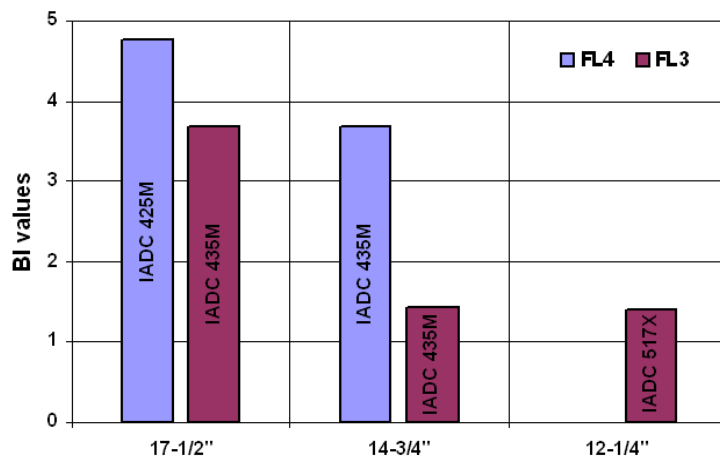


Figura 66: valori del *BI* dell'utensile con le migliori performance nel pozzo Pozzo E Or, identificati tramite diametro e formazione. I valori di *BI* variano significativamente all'interno di ogni singola formazione, quando si considerano differenti diametri.

Il numero di utensili da poter paragonare, classificati nei vari *IGO*, non è elevato e la loro distribuzione è particolarmente concentrata nelle fasi più piccole e nella formazione Piattaforma Apula #3.

L'operazione di raggruppamento dei *MI* in *IGO* non è risultata particolarmente efficace: concepita per frazionare il meno possibile la battuta, non ha ridotto significativamente il numero d'intervalli che la costituiscono rispetto alla divisione in *MI*. Inoltre, ha implicato delle approssimazioni: accorpate due o più *MI* (appartenenti alla stessa formazione, adiacenti in termini di profondità e riferiti alla medesima battuta dello stesso scalpello), ha comportato di dover calcolare nuovamente il valore dell'*ROP* media sull'ampiezza dell'*IGO*.

I pesi assegnati alle variabili dipendenti ( $C_{ROP} = 0.5$ ,  $C_H = 0.3$ ,  $C_{TQ} = 0.1$ ,  $C_{DG} = 0.1$ ) sono scaturiti da un'approfondita analisi. Cambiando i valori dei pesi, variano anche i valori assoluti del *BI*: mantenendo gli ordini di grandezza assegnati, non cambieranno comunque le posizioni assolute degli scalpelli con *performance* migliori e peggiori.

### 8.3 Il calcolo *Bit Index*, dell'*Economic Index*, della *Specific Energy* e del costo/metro applicato ai pozzi Pozzo A, Pozzo Bed Pozzo C

E' stato considerato il *FDC* geologico costituito dai seguenti pozzi:

| n. | Nome del pozzo          | n. | Nome del pozzo        |
|----|-------------------------|----|-----------------------|
| 1  | ALLI 01                 | 28 | Pozzo E OR(A) 5° foro |
| 2  | ALLI 1 ORA foro2        | 29 | Miglianico 2 Dir      |
| 3  | ALLI 1 ORA foro3        | 30 | Miglianico 02 DIR(A)  |
| 4  | Pozzo A                 | 31 | Monte Alpi W 1        |
| 5  | Pozzo C                 | 32 | Monte Alpi 5 OR       |
| 6  | Pozzo C OR (A)          | 33 | Monte Enoc NW 1       |
| 7  | Pozzo C OR (A) foro 2   | 34 | Monte Alpi E 1        |
| 8  | Cerro Falcone 1         | 35 | Monte Enoc NW 1 D A   |
| 9  | Cerro Falcone 2X        | 36 | Monte Enoc 2 Or       |
| 10 | Cerro Falcone 2xDir A   | 37 | Monte Enoc 3 Or       |
| 11 | Cerro Falcone 2xDir A-B | 38 | Monte Enoc 9 Or       |
| 12 | Cerro Falcone 1 Or (B)  | 39 | Monte Enoc W 1        |
| 13 | Cerro Falcone 3X        | 40 | Monte Enoc 4 D        |



| n. | Nome del pozzo              | n. | Nome del pozzo            |
|----|-----------------------------|----|---------------------------|
| 14 | Cerro Falcone 3x Or A       | 41 | Monte Alpi 6 Or           |
| 15 | Cerro Falcone 3 xor A foro2 | 42 | Monte Alpi 7 OR           |
| 16 | Cerro Falcone 3 xor A foro3 | 43 | Monte Alpi N 1 OR foro 2° |
| 17 | Cerro Falcone 3 xor A foro4 | 44 | Monte Alpi N 1 OR foro 3° |
| 18 | Cerro Falcone 3 xor A foro5 | 45 | Pozzo B                   |
| 19 | Cerro Falcone 3 xor A foro6 | 46 | Pozzo F OR                |
| 20 | Cerro Falcone 3 xor A foro7 | 47 | Monte Enoc W 1 OR (A)     |
| 21 | Cerro Falcone 3 xor A foro8 | 48 | Monte Alpi 01 OR(A)       |
| 22 | Miglianico 1                | 49 | Monte Gargaruso 1         |
| 23 | Pozzo E OR                  | 50 | Rocca Rossa 1             |
| 24 | Pozzo E or(A)               | 51 | Tempa la Manara 1         |
| 25 | Pozzo E or(A) 2° foro       | 52 | Volturino 1               |
| 26 | Pozzo E OR(A) 3° foro       | 53 | Volturino 1OR-A           |
| 27 | Pozzo E OR(A) 4° foro       |    |                           |

Tabella 10: *Formation Drillability Catalog* della Val d'Agri (aggiornato a settembre 2005)

I pozzi catalogati sono stati perforati dal 1994 al 2003, hanno molteplici profili direzionati e possono essere rilevanti anche per l'ampia gamma tecnologica degli utensili utilizzati.

La prima operazione effettuata su questo catalogo è quella di recuperare i parametri necessari per il suo completamento, finalizzato al calcolo del *Bit Index* con l'eq. (36), della *Specific Energy* con l'eq. (6) e (9), del costo/metro con l'eq. (49) e dell'*Economic Index* con l'eq. (39).

Le informazioni riguardo *WOB*, *RPM*, *Q* e *TQ* sono desunte dalle registrazioni in continuo delle compagnie di servizio (solitamente contenuti in uno o più file per pozzo denominati *Log\_vs\_depth*).

Ogni nuovo dato inserito è stato riferito al *MI*, abbandonando le operazioni di raggruppamento dei *MI* in *IGO*.

Essendo il *FDC* compilato con parametri registrati in base profondità, l'operazione di completamento è fatta con i dati dei parametri *WOB*, *RPM*, *Q* e *TQ* reperiti in continuo, ogni 25 cm.

Sono considerati i seguenti valori di costo: (1) impianto di perforazione a terra = 2083 €/ora (ricavato considerando un costo giornaliero di noleggio di 50.000 €); (2) B/pollice per uno scalpello a taglienti mobili e denti fresati = 1.575 €, (3) B/pollice per uno scalpello a taglienti mobili ed inserti = 3.465 €, (4) B/pollice per uno scalpello PDC o TSP = 5.775 €, (5) B/pollice per uno scalpello impregnato = 8.400 €.

Sulla base dall'elenco dei pozzi della tabella precedente, i documenti per ampliare il *FDC* (*Log\_vs\_depth*, tabelle scalpelli e rapporti finali di pozzo) ed eseguire il calcolo del *Bit Index* con l'eq. (36), della *Specific Energy* con l'eq. (6) e (9), del costo/metro con l'eq. (49) e dell'*Economic Index* con l'eq. (39), sono stati reperiti tramite l'accesso ai data base aziendali di Eni S.p.A. Div. E&P Power, S.p.e.o./A.s.d.a.p., My Doc e dai rapporti finali delle compagnie di *Mud Logging*.

In base ai dati che si sono riusciti a reperire, si è potuto lavorare sui pozzi Pozzo A, Pozzo C e Pozzo B, le cui caratteristiche principali sono riassunte nella tabella seguente.

| Nome del pozzo | Intervalli analizzati |        | Sezioni                                | Profilo | Formazioni         |
|----------------|-----------------------|--------|--|---------|--------------------|
|                | Top                   | Bottom |  |         |                    |
| Pozzo A        | 53                    | 6825   | 22", 16", 12-1/4", 8-1/2", 6"          | V, I, O | UI, AP             |
| Pozzo B        | 99                    | 4010   | 23", 17-1/2", 14-3/4", 12-1/4", 8-1/2" | V       | FL, CS, UI, SS, AP |
| Pozzo C        | 354                   | 5367   | 22", 16", 12-1/4", 8-1/2", 6"          | V, I, O | MF, SS, IU, AP     |

Tabella 11: Elementi caratterizzanti i pozzi in analisi. *V*, *I* e *O* indicano il profilo del pozzo Verticale, Inclinato ed Orizzontale. Gli acronimi delle formazioni sono i seguenti: *Flysch* Galestrino (*FL*), Calcare con Selce (*CS*), Unità Irpine (*UI*), Piattaforma Apula (*AP*), Scisti silicei (*SS*), Monte Facito (*MF*).

In totale sono stati analizzati circa 300 *MI*. Il calcolo del *BI* è svolto utilizzando i seguenti pesi:  $C_{ROP} = 0.5$ ,  $C_H = 0.3$ ,  $C_{TQ} = 0.1$ ,  $C_{DG} = 0.1$ .

Per il calcolo del *BI* dei vari scalpelli di cui si vogliono investigare le *performance*, è necessario disporre anche dei valori dei parametri degli scalpelli di riferimento.

Come valori dei parametri di riferimento ( $WOB_b$ ,  $RPM_b$ ,  $BHHP_b$ ,  $ROP_b$ ,  $H_b$ ,  $TQ_b$ ,  $DG_b$ ) sono stati utilizzati dei valori medi dei parametri per ogni fase e tipologia di utensile come schematizzato nelle tabelle seguenti.

| <b>Scalpelli triconici</b> | <b>22", 23"</b> | <b>17-1/2"</b> | <b>16"</b> | <b>14-3/4"</b> | <b>12-1/4"</b> | <b>8-1/2"</b> | <b>6"</b> |
|----------------------------|-----------------|----------------|------------|----------------|----------------|---------------|-----------|
| $WOB_b$                    | 5               | 17             | 16         | 14             | 18             | 8             | 6         |
| $RPM_b$                    | 100             | 150            | 150        | 130            | 130            | 100           | 100       |
| $BHHP_b$                   | 250             | 250            | 250        | 250            | 250            | 200           | 100       |
| $ROP_b$                    | 8               | 4              | 4          | 6              | 6              | 3             | 5         |
| $H_b$                      | 300             | 200            | 200        | 300            | 300            | 300           | 200       |
| $TQ_b$                     | 100             | 100            | 100        | 100            | 100            | 100           | 100       |
| $DG_b$                     | 1               | 1              | 1          | 1              | 1              | 1             | 1         |

Tabella 12: parametri di riferimento degli scalpelli a taglienti mobili, per il calcolo del *Bit Index*

| <b>Scalpelli a taglienti fissi</b> | <b>17-1/2"</b> | <b>16"</b> | <b>14-3/4"</b> | <b>12-1/4"</b> | <b>8-1/2"</b> | <b>6"</b> |
|------------------------------------|----------------|------------|----------------|----------------|---------------|-----------|
| $WOB_b$                            | 15             | 14         | 12             | 14             | 7             | 5         |
| $RPM_b$                            | 300            | 300        | 250            | 250            | 200           | 200       |
| $BHHP_b$                           | 250            | 250        | 250            | 250            | 200           | 100       |
| $ROP_b$                            | 6              | 6          | 10             | 10             | 5             | 5         |
| $H_b$                              | 400            | 400        | 500            | 500            | 500           | 500       |
| $TQ_b$                             | 200            | 200        | 200            | 200            | 200           | 200       |
| $DG_b$                             | 1              | 1          | 1              | 1              | 1             | 1         |

Tabella 13: parametri di riferimento degli scalpelli a taglienti fissi, per il calcolo del *Bit Index*

I calcoli del *Bit Index* con l'eq. (36), della *Specific Energy* con l'eq. (6) e (9), del costo/metro con l'eq. (49) e dell'*Economic Index* con l'eq. (39) sono effettuati per gli

utensili classificati all'interno dei *MI*, divisi per fasi, formazione e tipologia di utensile classificato.

La maggioranza dei calcoli è stata effettuata nei *MI* delle fasi 12-1/4'' e 8-1/2'', tranne un insieme di 72 scalpelli triconici nella fase 6''.

Le formazioni maggiormente presenti sono la Piattaforma Apula da #1 a #7 e le Unità Irpine da #1 a #3; la tipologia di utensili per lo più analizzata e quella degli scalpelli a taglienti mobili.

| <b>Fase</b> | <b>Formazione</b>           | <b>Numero di MI scalpelli a taglienti. mobili</b> | <b>Numero di MI scalpelli a taglienti. fissi</b> |
|-------------|-----------------------------|---|--|
| 17-1/2''    | Calcarea con Selce #1       | 1   |  |
| 17-1/2''    | Calcarea con Selce #2       | 9   |  |
| 17-1/2''    | <i>Flysch</i> Galestrino #4 | 2   |  |
| 17-1/2''    | <i>Flysch</i> Galestrino #5 | 2   |  |
| 17-1/2''    | <i>Flysch</i> Galestrino #5 |   | 1  |
| 17-1/2''    | Scisti Silicei #1           | 1   |  |
| 16''        | Calcarea con Selce #4       | 2   |  |
| 16''        | Monte Facito #1             | 1   |  |
| 16''        | Monte Facito #2             | 1   |  |
| 16''        | Scisti Silicei #3           | 2   |  |
| 16''        | Unità Irpine #1             |   | 1  |
| 16''        | Unità Irpine #3             | 9   |  |
| 16''        | Unità Irpine #3             |   | 5  |
| 14-3/4''    | Calcarea con Selce #2       | 4   |  |
| 14-3/4''    | Calcarea con Selce #4       | 2   |  |
| 14-3/4''    | <i>Flysch</i> Galestrino #4 | 2   |  |
| 14-3/4''    | <i>Flysch</i> Galestrino #5 | 5   |  |
| 14-3/4''    | Unità Irpine #3             | 6   |  |
| 12-1/4''    | Piattaforma Apula #2        | 1   |  |
| 12-1/4''    | Piattaforma Apula #3        | 1   |  |
| 12-1/4''    | Piattaforma Apula #3        |   | 5  |
| 12-1/4''    | Piattaforma Apula #6        | 3   |  |
| 12-1/4''    | Unità Irpine #1             |   | 4  |
| 12-1/4''    | Unità Irpine #2             | 2   |  |
| 12-1/4''    | Unità Irpine #2             | 7   |  |
| 12-1/4''    | Unità Irpine #3             |   | 20   |
| 12-1/4''    | Unità Irpine #3             | 5   |  |
| 8-1/2''     | Piattaforma Apula #1        | 6   |  |
| 8-1/2''     | Piattaforma Apula #1        |   | 6  |
| 8-1/2''     | Piattaforma Apula #2        | 2   |  |
| 8-1/2''     | Piattaforma Apula #3        | 16  |  |
| 8-1/2''     | Piattaforma Apula #3        |   | 18   |
| 8-1/2''     | Piattaforma Apula #4        | 2   |  |
| 8-1/2''     | Piattaforma Apula #5        | 4   |  |

|        |                      |    |   |
|--------|----------------------|----|---|
| 8-1/2" | Piattaforma Apula #7 | 1  |   |
| 6"     | Piattaforma Apula #2 |    | 1 |
| 6"     | Piattaforma Apula #3 |    | 9 |
| 6"     | Piattaforma Apula #3 | 72 |   |
| 6"     | Piattaforma Apula #4 |    | 2 |
| 6"     | Piattaforma Apula #5 |    | 2 |
| 6"     | Piattaforma Apula #7 |    | 4 |
| 6"     | Unità Irpine #3      |    | 2 |

Tabella 14 (pagina precedente): insieme dei *MI* analizzati dei 3 pozzi Pozzo A, Pozzo C e Pozzo B, divisi per fase, formazione e tipologia di utensile. In ogni riga si può leggere il numero dei *MI* che, per quella fase, formazione e tipologia di utensile possono essere paragonati tra loro per il calcolo del *BI*.

Si presentano ora alcuni risultati considerati significativi dell'analisi dei risultati ottenuti con calcoli del *Bit Index* con l'eq. (36), della *Specific Energy* con l'eq. (6) e (9), del costo/metro con l'eq. (49) e dell'*Economic Index* con l'eq. (39).

Si ricorda che, per ogni grafico, in ascissa sono riportati i numeri dei *MI* analizzati: tutti i numeri sono di 4 cifre, se la prima è 1 i *MI* appartengono al pozzo Pozzo A, 2 al pozzo Pozzo B e 3 al pozzo Pozzo C. Le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all'interno del singolo pozzo (es. 3014 è il *MI* n. 14 del pozzo Pozzo C). In ordinata sono riportati i valori *Bit Index* con l'eq. (36), della *Specific Energy* con l'eq. (6) e (9), del costo/metro con l'eq. (49) e dell'*Economic Index* con l'eq. (39).

Partendo dalle due espressioni della *SE* ottenute con l'eq. (6) e (9), si nota come il loro andamento sia simile. Ad eccezione di qualche *MI* dove si registrano andamenti opposti, in generale, la similitudine aumenta con la diminuzione del diametro della fase (figure seguenti).

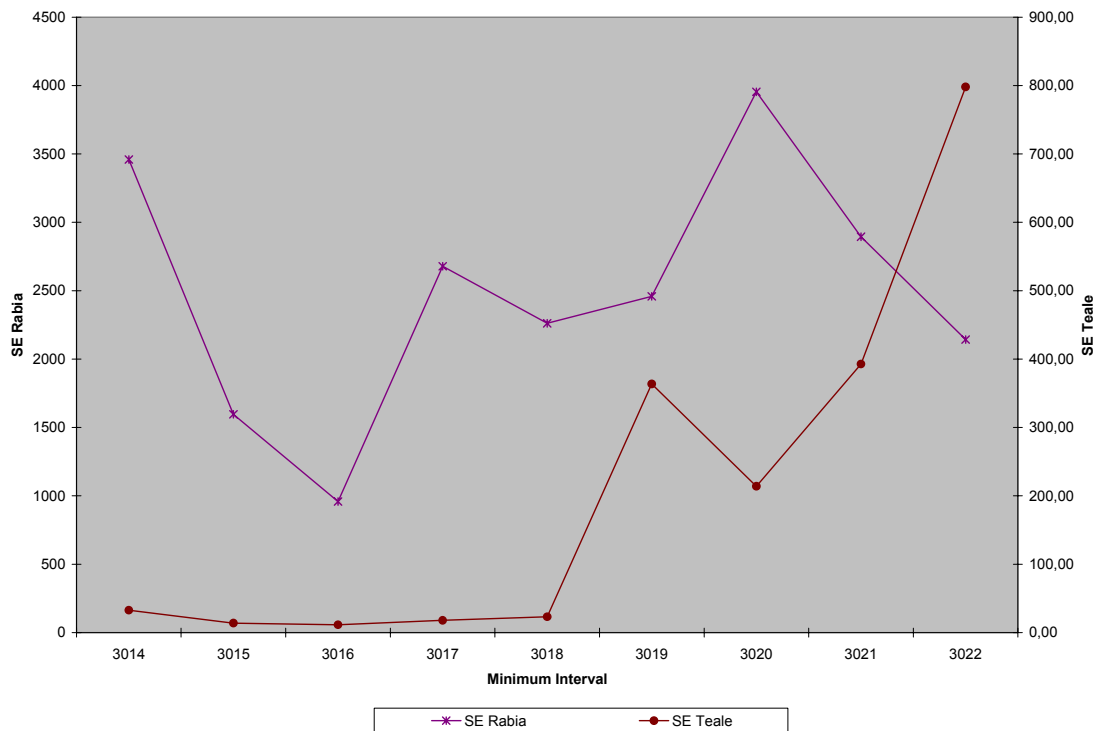


Figura 67: *SE* di nove scalpelli triconici (fase 17-1/2”), formazione Calcare con Selce #2. In ascisse sono riportati i numeri dei *MI* analizzati: tutti i numeri sono di 4 cifre, se la prima è 1 i *MI* appartengono al pozzo Pozzo A, 2 al pozzo Pozzo Be 3 al pozzo Pozzo C. Le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all’interno del singolo pozzo (es. 3014 è il *MI* n. 14 del pozzo Pozzo C). In ordinate sono riportati i valori dell’indice *SE Rabia* calcolato con l’eq. (9) e l’indice *SE Teale* calcolato con l’eq. (6).

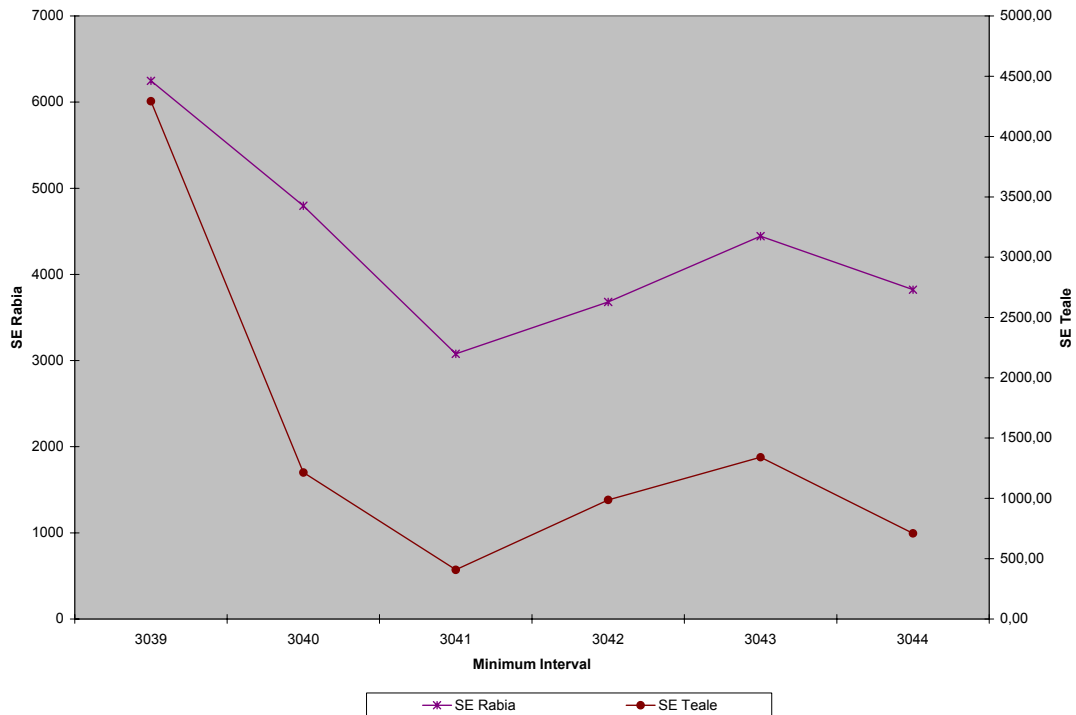


Figura 68: *SE* di sei scalpelli triconici (fase 14-3/4”), per la formazione Unità Irpine #3. In ascisse sono riportati i numeri dei *MI* analizzati: tutti i numeri sono di 4 cifre, se la prima è 1 i *MI* appartengono al pozzo Pozzo A, 2 al pozzo Pozzo Be 3 al pozzo Pozzo C. Le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all’interno del singolo pozzo (es. 3039 è il *MI* n. 39 del pozzo Pozzo C). In ordinate sono riportati i valori dell’indice *SE Rabia* calcolato con l’eq. (9) e l’indice *SE Teale* calcolato con l’eq. (6).

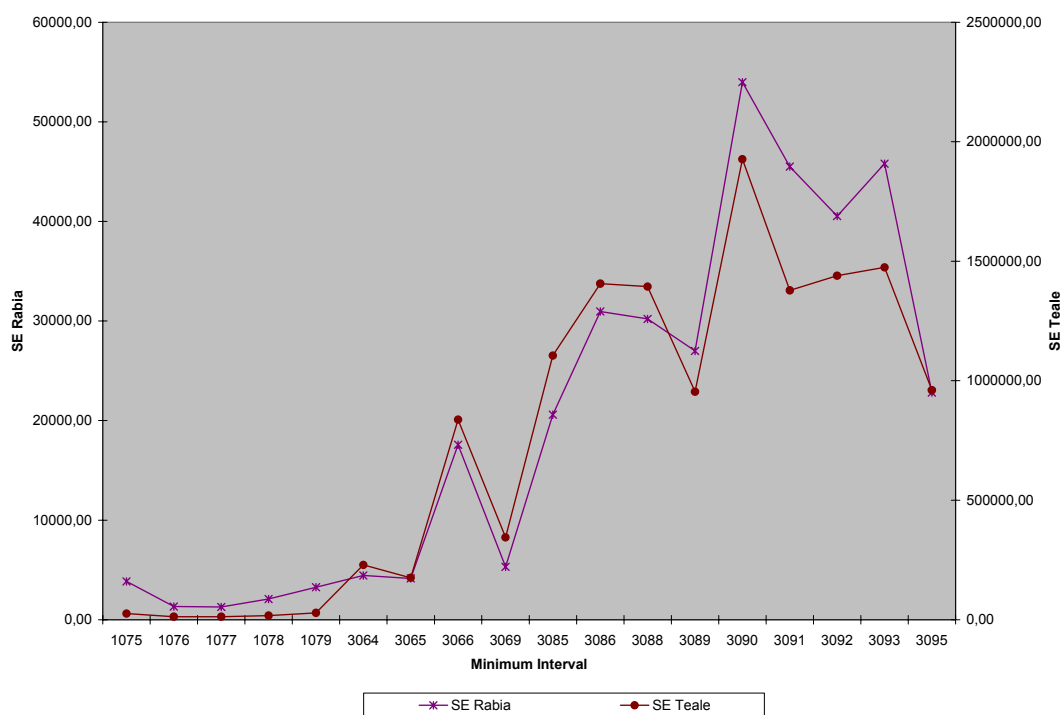


Figura 69: *SE* di diciotto scalpelli a taglianti fissi (fase 8-1/2”), per la formazione Piattaforma Apula #3. In ascisse sono riportati i numeri dei *MI* analizzati: tutti i numeri sono di 4 cifre, se la prima è 1 i *MI* appartengono al pozzo Pozzo A, 2 al pozzo Pozzo Be 3 al pozzo Pozzo C. Le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all’interno del singolo pozzo (es. 3069 è il *MI* n. 69 del pozzo Pozzo C). In ordinate sono riportati i valori dell’indice *SE Rabia* calcolato con l’eq. (9) e l’indice *SE Teale* calcolato con l’eq. (6).

E’ stato studiato l’andamento della *SE* con il *BI*, della *SE* con l’inverso del *BI* e del *BI* con l’inverso della *SE*.

Sono stati preparati sei grafici che riportano in ascissa il numero dei *MI* dei tre pozzi, ed in ordinata gli andamenti dei suddetti indici. In questo modo, si cerca di capire se i due indici sono paragonabili, in quanto *SE* è già stato utilizzato da vari autori come strumento di valutazione delle *performance* degli scalpelli e per la scelta degli stessi, mentre il *BI* è di nuova introduzione e le sue potenzialità non sono ancora ben definite. L’energia specifica *SE* è stata calcolata con l’eq. (6) e (9), mentre il *BI* con l’eq. (36),



utilizzando come parametri degli scalpelli di riferimento prima i valori unitari successivamente i valori medi per fase e tipologia d'utensile.

Le figure seguenti, identificano alcuni andamenti ritenuti significativi.

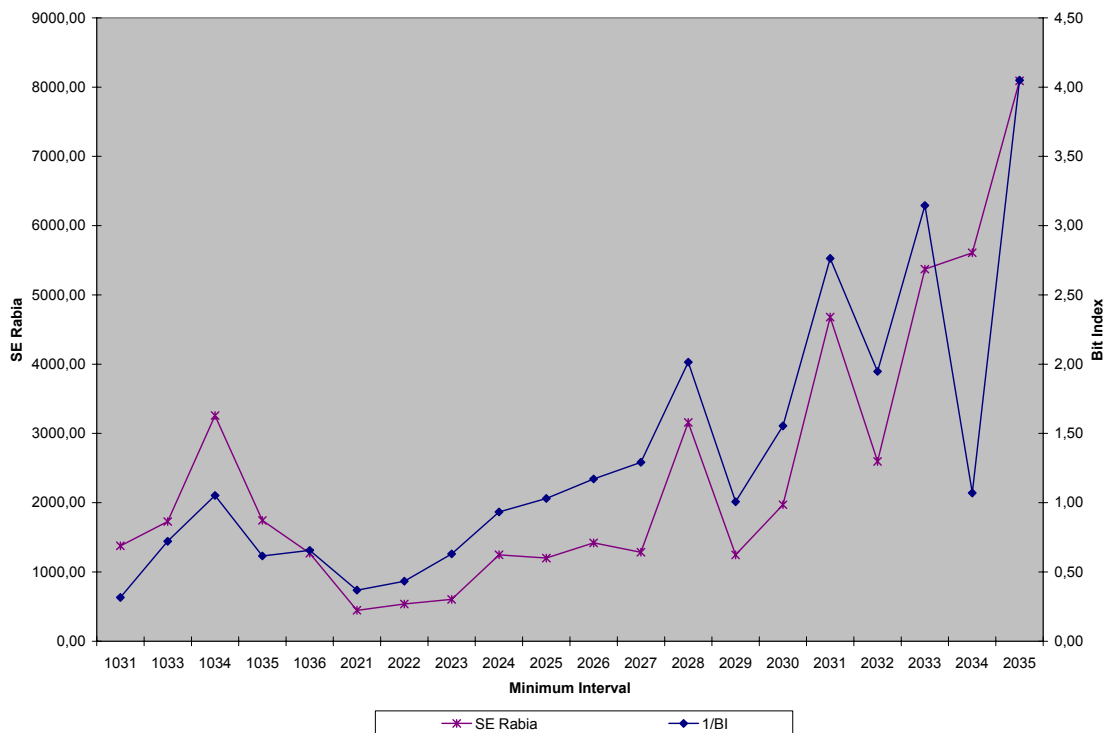


Figura 70: Andamento della  $SE$  e dell'inverso di  $BI$  per venti scalpelli a taglienti fissi (fase 12-1/4"), nella formazione Unità Irpine #3 . In ascisse sono riportati i numeri dei MI analizzati: tutti i numeri sono di 4 cifre, se la prima è 1 i MI appartengono al pozzo Pozzo A, 2 al pozzo Pozzo Be 3 al pozzo Pozzo C. Le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del MI all'interno del singolo pozzo (es. 2035 è il MI n. 35 del pozzo Pozzo B). In ordinate sono riportati i valori dell'indice  $SE$  Rabia calcolato con l'eq. (9), l'indice  $1/BI$  calcolato con l'inverso del valore ottenuto con l'eq. (36).

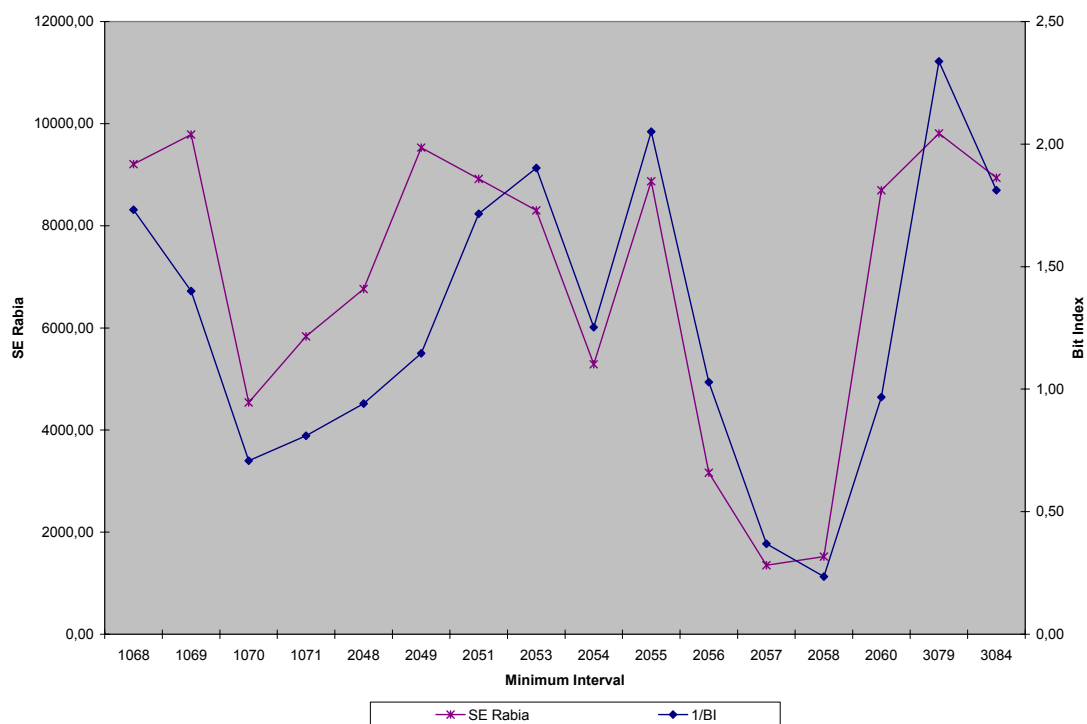


Figura 71: Andamento della *SE* e dell'inverso del *BI* per sedici scalpelli triconici (fase 8-1/2"), nella formazione Piattaforma Apula #3. In ascisse sono riportati i numeri dei MI analizzati: tutti i numeri sono di 4 cifre, se la prima è 1 i MI appartengono al pozzo Pozzo A, 2 al pozzo Pozzo Be 3 al pozzo Pozzo C. Le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del MI all'interno del singolo pozzo (es. 2049 è il MI n. 49 del pozzo Pozzo B). In ordinate sono riportati i valori dell'indice *SE Rabia* calcolato con l'eq. (9), l'indice *1/BI* calcolato con l'inverso del valore ottenuto con l'eq. (36).

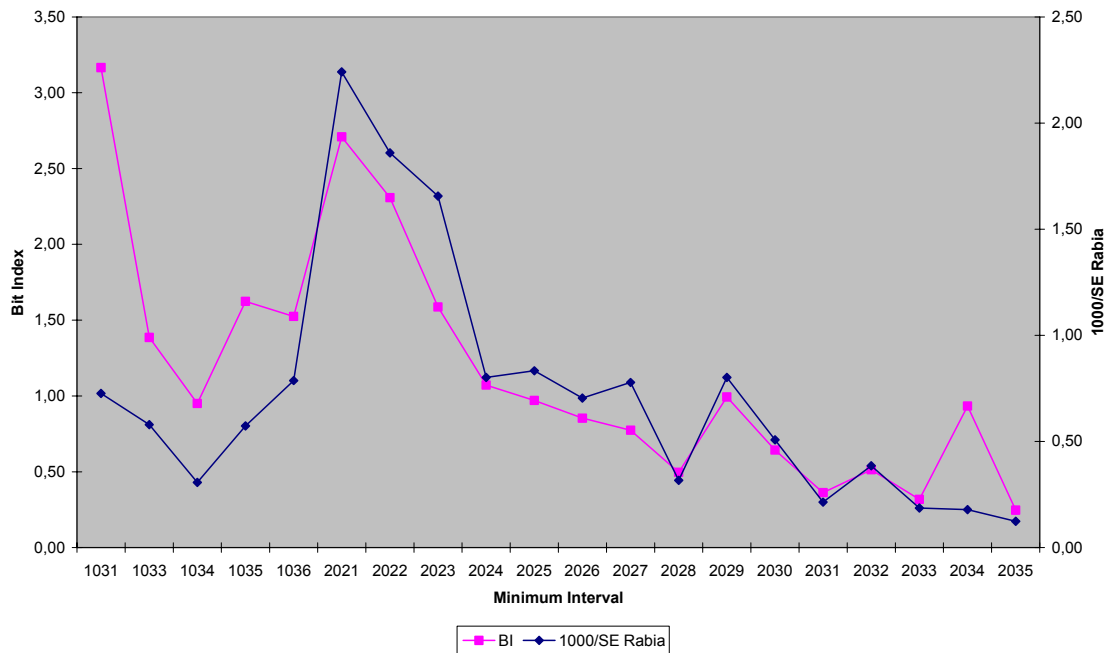


Figura 72: Andamento del *BI* e dell'inverso della *SE* per venti scalpelli a taglienti fissi (fase 12-1/4"), nella formazione Unità Irpine #3 . In ascisse sono riportati i numeri dei *MI* analizzati: tutti i numeri sono di 4 cifre, se la prima è 1 i *MI* appartengono al pozzo Pozzo A, 2 al pozzo Pozzo Be 3 al pozzo Pozzo C. Le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all'interno del singolo pozzo (es. 2027 è il *MI* n. 27 del pozzo Pozzo B). In ordinate sono riportati i valori del *BI* calcolato con l'eq. (36) e l'indice *1000/SE Rabia* calcolato con l'inverso del valore ottenuto con l'eq. (9).

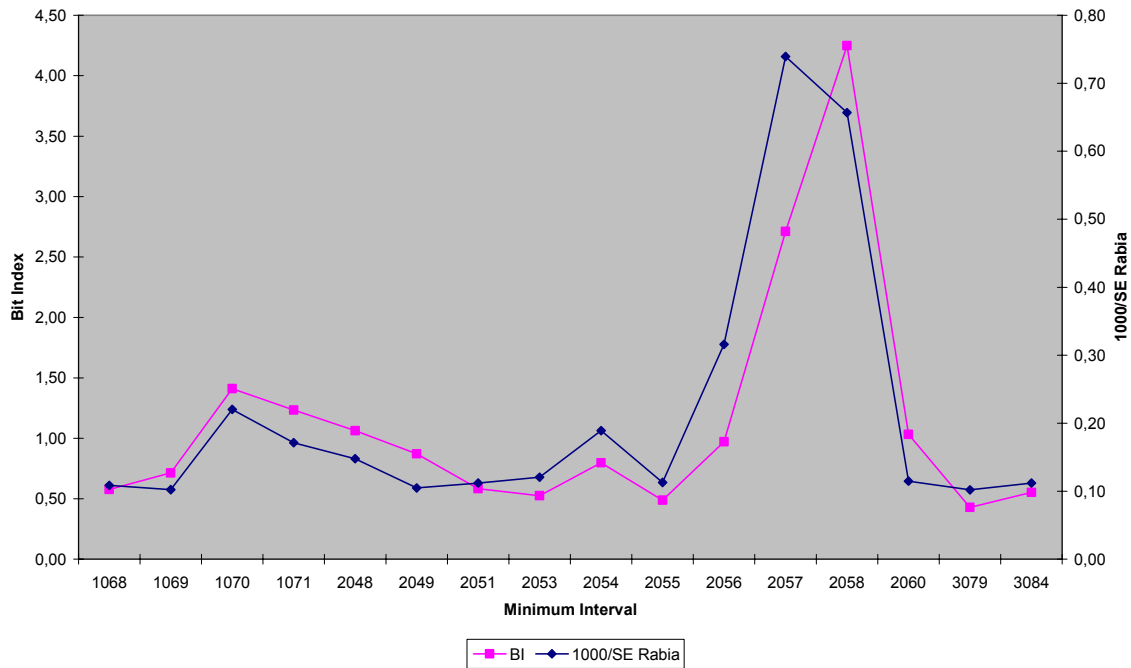


Figura 73: Andamento del *BI* e dell'inverso della *SE* per sedici scalpelli triconici (fase 8-1/2"), nella formazione Piattaforma Apula #3 . In ascisse sono riportati i numeri dei *MI* analizzati: tutti i numeri sono di 4 cifre, se la prima è 1 i *MI* appartengono al pozzo Pozzo A, 2 al pozzo Pozzo Be 3 al pozzo Pozzo C. Le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all'interno del singolo pozzo (es. 2056 è il *MI* n. 56 del pozzo Pozzo B). In ordinate sono riportati i valori del *BI* calcolato con l'eq. (36) e l'indice *1000/SE Rabia* calcolato con l'inverso del valore ottenuto con l'eq. (9).

Paragonando un indice con l'inverso dell'altro si sono riscontrati andamenti simili, particolarmente tra il *BI* e l' inverso del valore della *SE*. Questo è particolarmente accentuato nelle fasi 12-1/4" e 8-1/2".

Come ultima analisi si è paragonato, in un unico grafico, l'andamento del *BI*, dell' inverso della *SE*, del  $CM_{MI}$ , e dell'*EI*. In questo modo, si cerca di capire se i quattro indici sono paragonabili, in quanto *SE* è già stato utilizzato da vari autori come strumento di valutazione delle *performance* degli scalpelli e per la scelta degli stessi, il

*CM* è, in generale, il criterio più usato per confrontare le *performance* dei vari scalpelli, mentre il *BI* e l'*EI* sono di nuova introduzione.

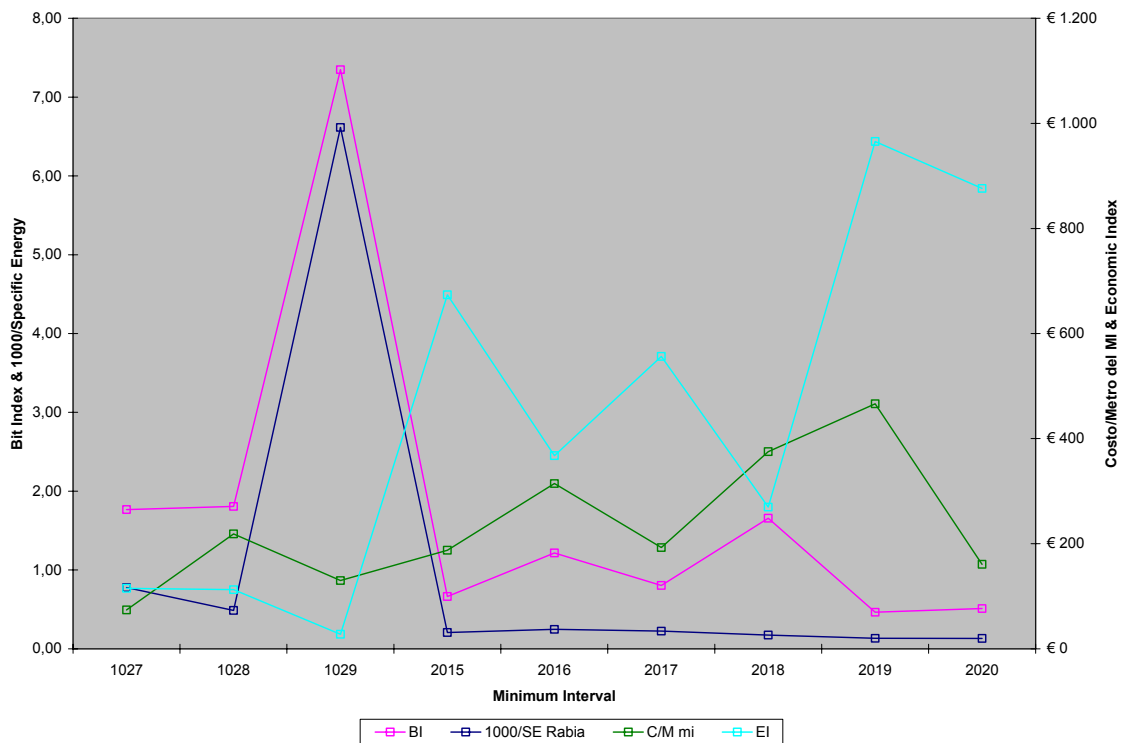


Figura 74: Andamento del *BI*, dell'inverso della *SE*, del *CM* e dell'*EI* per nove scalpelli triconici, nella fase 16", per la formazione Unità Irpine #3 . In ascisse sono riportati i numeri dei *MI* analizzati: tutti i numeri sono di 4 cifre, se la prima è 1 i *MI* appartengono al pozzo Pozzo A, 2 al pozzo Pozzo Be 3 al pozzo Pozzo C. Le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all'interno del singolo pozzo (es. 2016 è il *MI* n. 16 del pozzo Pozzo B). In ordinate sono riportati i valori del *BI* calcolato con l'eq. (36), l'indice *1000/SE Rabia* calcolato con l'inverso del valore ottenuto con l'eq. (9), il valore di  $CM_{MI}$  calcolato con l'eq. (49) ed il valore dell'*EI* determinato con l'eq. (39).

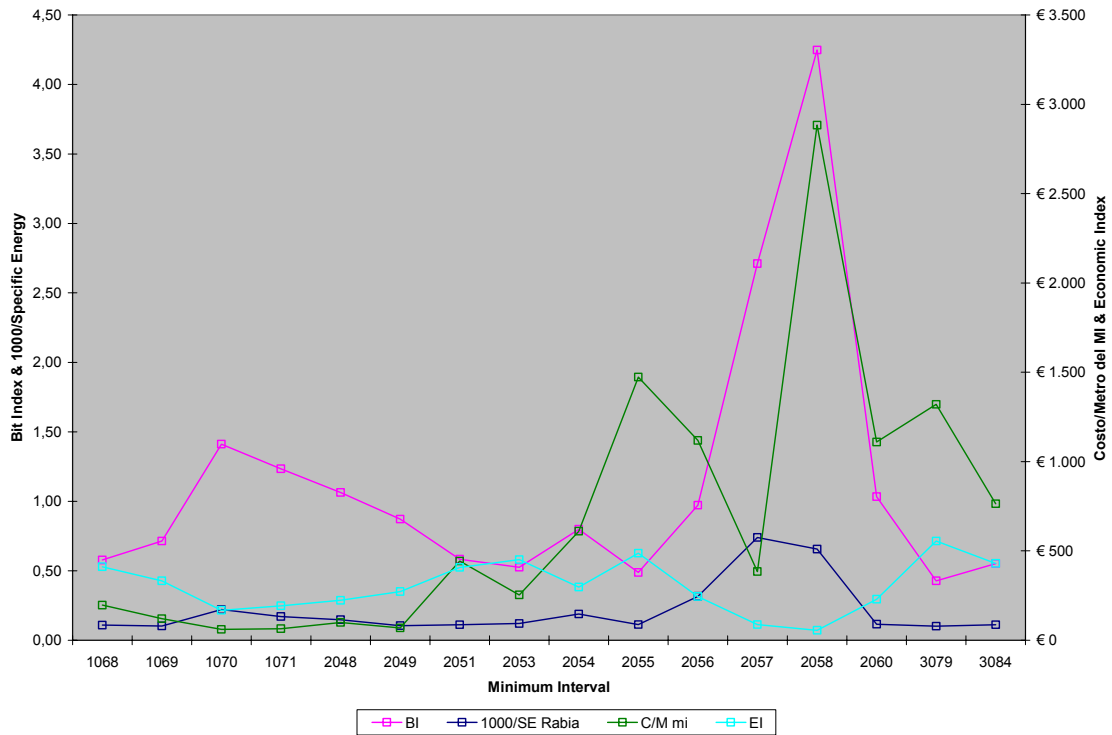


Figura 75: Andamento del  $BI$ , dell'inverso della  $SE$ , del  $CM$  e dell' $EI$  per sedici scalpelli triconici, nella fase 8-1/2", per la formazione Piattaforma Apula #3 . In ascisse sono riportati i numeri dei  $MI$  analizzati: tutti i numeri sono di 4 cifre, se la prima è 1 i  $MI$  appartengono al pozzo Pozzo A, 2 al pozzo Pozzo Be 3 al pozzo Pozzo C. Le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del  $MI$  all'interno del singolo pozzo (es. 2053 è il  $MI$  n. 53 del pozzo Pozzo B). In ordinate sono riportati i valori del  $BI$  calcolato con l'eq. (36), l'indice  $1000/SE$  Rabia calcolato con l'inverso del valore ottenuto con l'eq. (9), il valore di  $CM_{MI}$  calcolato con l'eq. (49) ed il valore dell' $EI$  determinato con l'eq. (39).

L' $EI$  è inversamente proporzionale al  $BI$  e visto che i costi degli scalpelli sono fissati come valori proporzionali al diametro dell' utensile, l'andamento dell' $EI$  è opposto a quello del  $BI$ . Il  $CM_{MI}$  non risulta particolarmente correlato ne con il  $BI$  ne con la  $SE$ .

#### 8.4 Il calcolo *Bit Index*, della *Specific Energy* e del costo/metro applicato ad ulteriori pozzi del *FDC*

E' ora presentato un caso di studio inerente all'applicazione del modello *BI/EI* ai *MI* di quattro pozzi profondi recentemente perforati in Val D'Agri: Pozzo A, Pozzo B, Pozzo C e Pozzo D [38].

Sono calcolati i valori del *Bit Index* con l'eq. (36), della *Specific Energy* con l'eq. (9), (denominata, in questo caso,  $SE_R$ ) del costo/metro con l'eq. (49) e dell'*Economic Index* con l'eq. (39).

E' bene ricordare che i valori di  $WOB_Z$ ,  $RPM_Z$ ,  $HHP_Z$ ,  $TQ_Z$  e  $DG_Z$  sono riferiti al *MI*, mentre con  $H_Z$  (intervallo perforato) si intende la battuta dello scalpello classificato nel *MI*.

I valori dei parametri per gli scalpelli di riferimento (pedice  $b$ ) necessari al calcolo del *Bit Index* sono riportati nelle due tabelle definite nel paragrafo precedente, come anche i valori dei costi orari di noleggio dell'impianto ed il costo dello scalpello.

I risultati dell'analisi permettono di identificare, per ogni fase, tipologia di utensile e formazione geologica perforata lo scalpello che ha lavorato con le migliori *performance* in termini di  $BI_Z$ ,  $SE_R$  e  $CM_{MI}$ .

Le figure seguenti identificano un primo esempio di risultati ottenibili con l'analisi tramite *Bit Index* dei *MI* classificati nel *FDC* per i pozzi Pozzo A, Pozzo B, Pozzo C e Pozzo D, riferito ad utensili di diametro 16", a taglienti mobili e che hanno perforato la formazione delle Unità Irpine #3.

I grafici seguenti sono organizzati in modo che sull'asse verticale ogni *MI* sia identificato tramite un codice numerico di quattro cifre: la prima identifica il pozzo dove il *MI* è stato perforato (1 rappresenta Pozzo A, 2 rappresenta Pozzo B, 3 rappresenta Pozzo C), le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all'interno del singolo pozzo (es. 1027 è il *MI* n. 27 del pozzo Pozzo A).

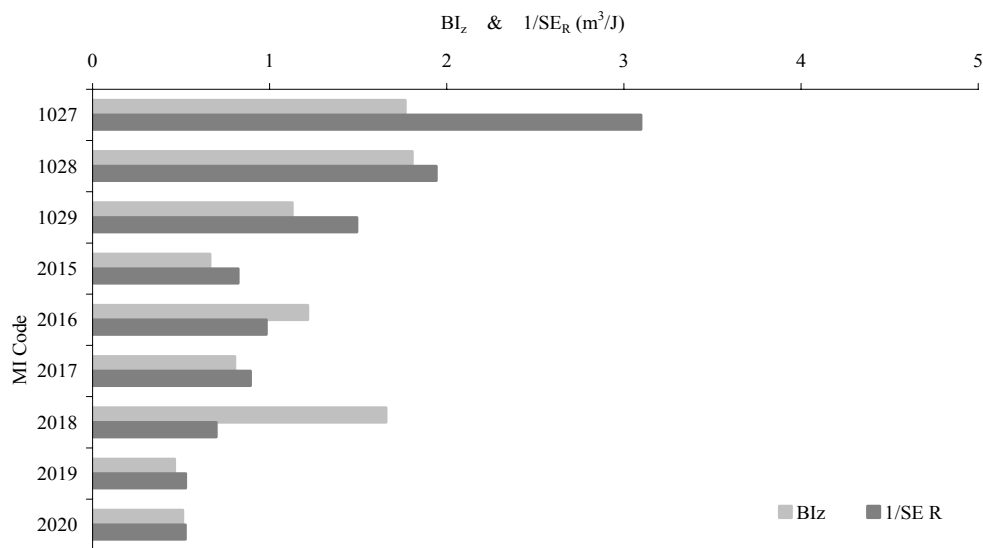


Figura 76: Rappresentazione grafica del *Bit Index* e del reciproco dell'energia specifica per scalpelli di diametro 16", triconici, che hanno perforato la formazione delle Unità Irpine #3. Sull'asse verticale ogni *MI* sia identificato tramite un codice numerico di quattro cifre: la prima identifica il pozzo dove il *MI* è stato perforato (1 rappresenta Pozzo A, 2 rappresenta Pozzo B, 3 rappresenta Pozzo C), le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all'interno del singolo pozzo (es. 1027 è il *MI* n. 27 del pozzo Pozzo A).

Confrontando i valori del *Bit Index* con il reciproco della *Specific Energy*, lo scalpello che ha ottenuto le migliori *performance* è quello che ha il valore più alto sia  $BI_Z$  che di  $SE_R$ : in questo caso, osservando la figura precedente, il miglior utensile è lo scalpello che ha perforato il *MI* #1027.

La figura successiva riporta i valori di  $BI_Z$  e di  $CM_{MI}$  per gli stessi *MI* considerati precedentemente.



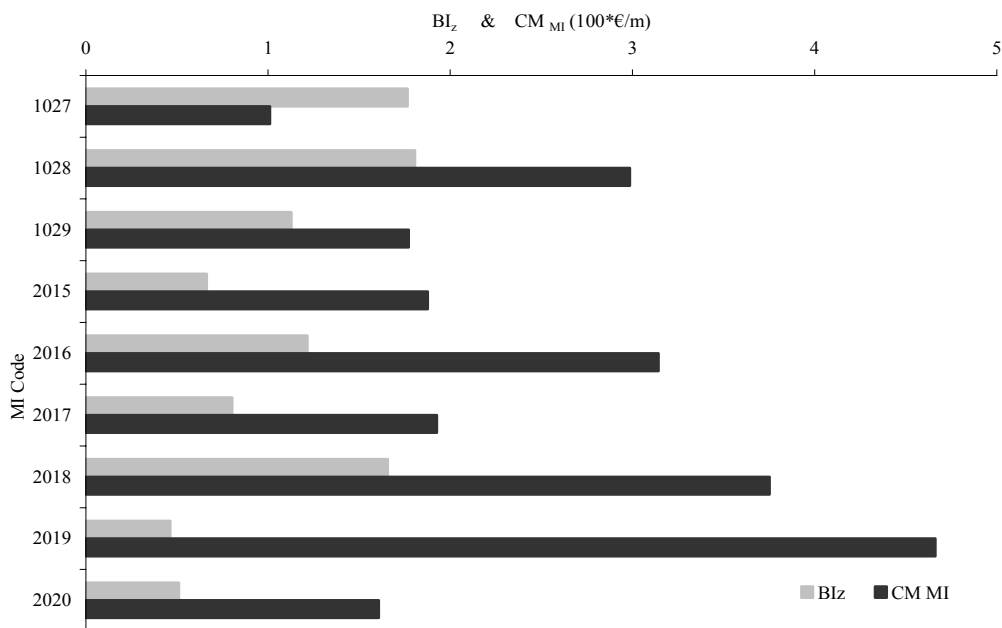


Figura 77: Rappresentazione grafica del *Bit Index* e del costo/metro per *MI* per scalpelli di diametro 16", triconici, che hanno perforato la formazione delle Unità Irpine #3. Sull'asse verticale ogni *MI* sia identificato tramite un codice numerico di quattro cifre: la prima identifica il pozzo dove il *MI* è stato perforato (1 rappresenta Pozzo A, 2 rappresenta Pozzo B, 3 rappresenta Pozzo C), le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all'interno del singolo pozzo (es. 1027 è il *MI* n. 27 del Pozzo A).

Confrontando i valori del *Bit Index* con quelli di  $CM_{MI}$ , lo scalpello che ha ottenuto le migliori *performance* è quello che ha il valore più alto sia  $BI_Z$  ed il valore minore di  $CM_{MI}$ : anche in questo caso, osservando la figura 12, il miglior utensile è lo scalpello che ha perforato il *MI* #1027.

In questo caso l'identificazione dello scalpello che ha perforato con le migliori *performance* non è ambigua per le tre metodologie ( $BI_Z$ ,  $1/SE_R$  e  $CM_{MI}$ ), è l'utensile classificato nel *MI* #1027, Hughes Christensen MX03, codice IADC 415M.

Un secondo esempio di un'analisi condotta come la precedente è stata fatta per gli scalpelli a taglianti fissi di diametro 12-1/4" che hanno perforato la formazione delle Unità Irpine #3.

Le figure seguenti rappresentano i valori di  $BI_z$ ,  $1/SE_R$  e  $CM_{MI}$  con le stesse modalità delle figure precedenti.

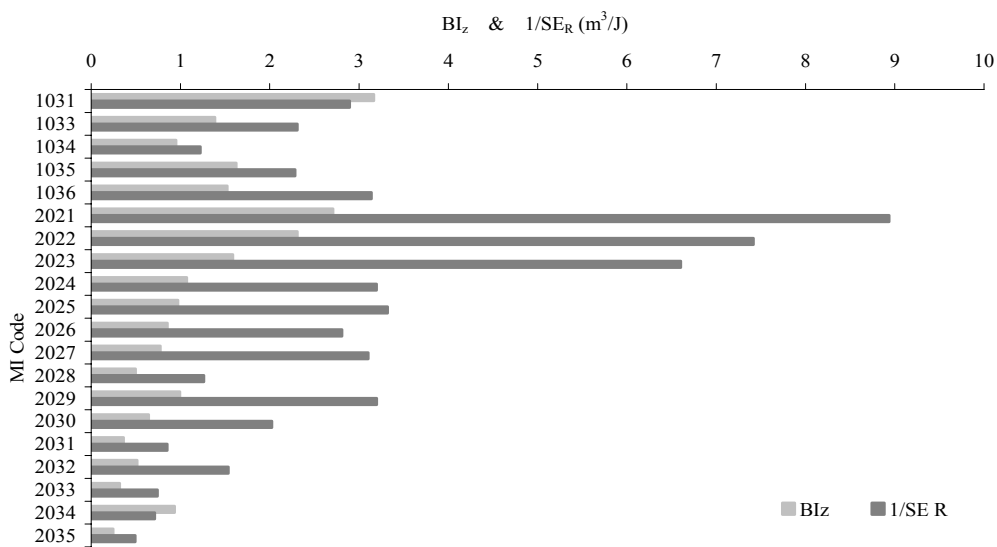


Figura 78: Rappresentazione grafica del *Bit Index* e del reciproco dell'energia specifica per scalpelli di diametro 12-1/4" a taglianti fissi, che hanno perforato la formazione delle Unità Irpine #3. Sull'asse verticale ogni *MI* sia identificato tramite un codice numerico di quattro cifre: la prima identifica il pozzo dove il *MI* è stato perforato (1 rappresenta Pozzo A, 2 rappresenta Pozzo B, 3 rappresenta Pozzo C), le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all'interno del singolo pozzo (es. 1031 è il *MI* n. 31 del pozzo Pozzo A).

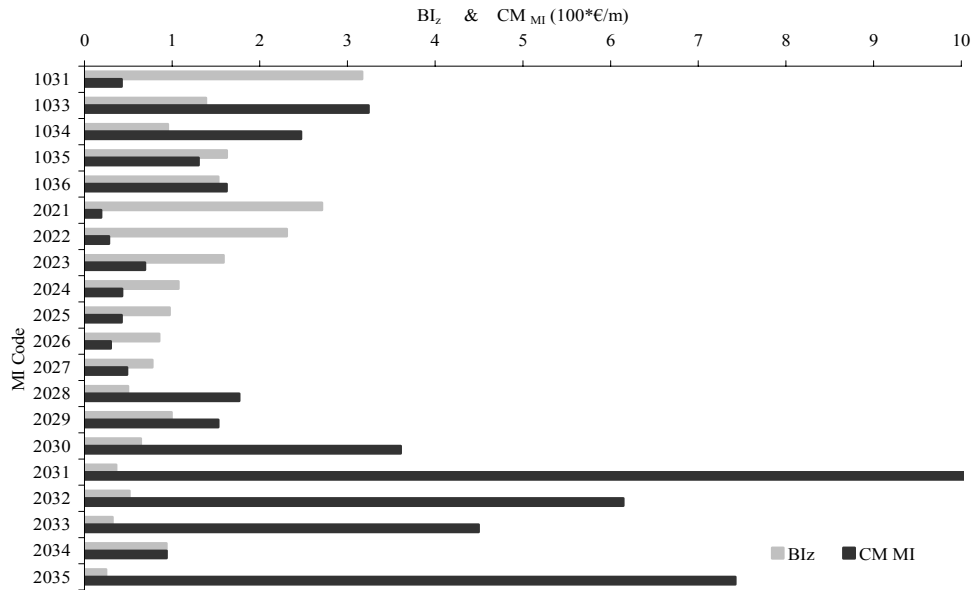


Figura 79: Rappresentazione grafica del *Bit Index* e del costo/metro per *MI* per scalpelli di diametro 12-1/4” a taglienti fissi, che hanno perforato la formazione delle Unità Irpine #3. Sull’asse verticale ogni *MI* sia identificato tramite un codice numerico di quattro cifre: la prima identifica il pozzo dove il *MI* è stato perforato (1 rappresenta Pozzo A, 2 rappresenta Pozzo B, 3 rappresenta Pozzo C), le restanti 3 cifre identificano il numero progressivo, in termini di profondità, del *MI* all’interno del singolo pozzo (es. 1031 è il *MI* n. 31 del pozzo Pozzo A).

Anche in questo caso l’identificazione dello scalpello che ha perforato con le migliori *performance* non è ambigua per le tre metodologie ( $BI_Z$ ,  $I/SE_R$  e  $CM_{MI}$ ), è l’utensile classificato nel il *MI* #2021 che ha tra i valori più altri di  $BI_Z$ , il più alto di  $I/SE_R$  ed il  $CM_{MI}$  più basso. Lo scalpello in esame è prodotto da *Hughes Christensen BD535*, con codice *IADC M323*.

Le figure precedenti sono esempi verosimilmente indicativi dell’applicazione della metodologia di lavoro basata sul *Bit Index* applicato al *FDC* ampliato.

In totale, per i pozzi Pozzo A, Pozzo B, Pozzo C e Pozzo D, sono stati analizzati 212 *MI* e nel 70% dei casi i grafici  $BI_Z$  vs  $I/SE_R$  identificavano lo stesso scalpello come quello che ha perforato con le migliori *performance*. Nel 32% dei casi i grafici  $BI_Z$  vs  $CM_{MI}$

identificavano lo stesso scalpello come quello che ha perforato con le migliori *performance*.

La percentuale di coincidenza dei risultati tra  $BI_Z$  e  $CM_{MI}$  non è così elevata come quella tra  $BI_Z$  e  $1/SE_R$ , indicativamente perché il costo/metro è calcolato con valori medi di mercato, che non sempre considerano le *feature* degli scalpelli che, attualmente, influiscono notevolmente sul prezzo dell'utensile.

### **8.5 Il calcolo *Bit Index*, dell'*Economic Index*, della *Specific Energy* e del costo/metro per scalpelli impregnati**

Questo paragrafo descrive una specifica applicazione del *Bit Index* al *FDC*, cercando di dimostrare come tale metodologia di lavoro può essere utilizzata in tutti i casi di valutazione delle *performance* degli scalpelli.

E' descritta l'analisi delle *performance* di alcuni scalpelli a taglienti fissi (impregnati e *PDC*) che hanno perforato formazioni dure ed abrasive nel pozzo Pozzo C [39]. Nella zona della Val d'Agri tali formazioni sono frequenti e sono spesso intervallate da formazioni più soffici. Gli scalpelli triconici ed i *PDC* utilizzati per queste formazioni sono estratti generalmente molto usurati (vedi figura seguente) e, quindi, si ricorre all'uso di scalpelli impregnati.

Nel presente caso di studio sono analizzate quattro battute di scalpelli impregnati e *PDC* utilizzati nel pozzo Pozzo C: gli elementi caratterizzanti le battute sono gabellati nella pubblicazione originale [39] (vedi allegato 3).

Gli scalpelli impregnati utilizzati (tutti diametro 8-1/2") sono identificati con lettere greche ( $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ ), nell'ultima battuta è stato disceso uno scalpello *ree-run* (*run 2rr*) e tutte le battute sono state effettuate attraverso la formazione Piattaforma Apula #3 (*AP3*).



Figura 80: Usura negli scalpelli a rulli e PDC (Eni S.p.A., Divisione E&P).

Specificatamente, gli scalpelli utilizzati sono i seguenti: (1) Run # 1,  $\alpha$ , Bit Hug. HC407 (fig. 16), Bit Record di Pozzo C, bit n. 25, (2) Run # 2,  $\beta$ , Bit Hug. HH376, Bit Record di Pozzo C, bit n. 35, (3) Run # 3,  $\gamma$ , Bit Hug. HH356G8, Bit Record di Pozzo C, bit n. 36, (4) Run # 2rr,  $\beta$ , Bit Hug. HH376, Bit Record di Pozzo C, bit n. 35rr.

Ciascuna battuta degli scalpelli identificati sopra è divisa nei MI del FDC ed i risultati di calcoli di  $BI_Z$  effettuato con l'eq. (36), della Specific Energy effettuata con l'eq. (9) (denominata, in questo caso,  $SE_R$ ) e CM effettuato con l'eq. (49) sono riportati nella tabella seguente, dove ogni MI è identificato con un numero ed una lettera. Il MI 2c (rr) si riferisce a tutta la battuta 2rr.

| MI      | IADC code | Bit name | Invest. Interval (Top-Bottom) | BI   | SE (MJ/m <sup>3</sup> ) | CM (€/m) |
|---------|-----------|----------|-------------------------------|------|-------------------------|----------|
| 1a      | M333      | $\alpha$ | 3055 m – 3100 m               | 0.67 | 1115                    |          |
| 1b      | M333      | $\alpha$ | 3100 m – 3118 m               | 0.86 | 1040                    | 1617     |
| 2a      | M841      | $\beta$  | 3615 m – 3675 m               | 1.40 | 5164                    |          |
| 2b      | M841      | $\beta$  | 3675 m – 3732 m               | 1.13 | 7762                    | 1648     |
| 2c (rr) | M841      | $\beta$  | 3966 m – 4010 m               | 1.43 | 5719                    | 1327     |
| 3a      | M841      | $\gamma$ | 3744 m – 3768 m               | 1.04 | 7574                    |          |
| 3b      | M841      | $\gamma$ | 3768 m – 3802 m               | 1.33 | 6769                    |          |
| 3c      | M841      | $\gamma$ | 3802 m – 3825 m               | 0.77 | 13538                   |          |
| 3d      | M841      | $\gamma$ | 3825 m – 3853 m               | 0.93 | 11410                   |          |
| 3e      | M841      | $\gamma$ | 3853 m – 3872 m               | 1.05 | 10164                   |          |
| 3f      | M841      | $\gamma$ | 3872 m – 3954 m               | 0.83 | 11484                   | 1428     |

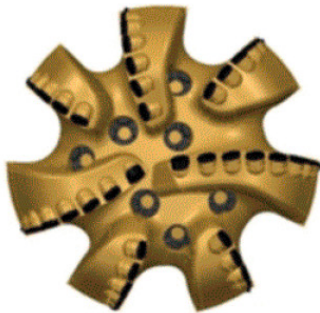
Tabella 15: Risultati del caso in analisi in termini di  $BI_Z$ ,  $SE_R$  e CM.

## 8 1/2" HC407 (215.9 mm)



- **Stability Features** These features ensure the bit will drill in a stable mode a greater percentage of on-bottom time, and limit the severity of damaging bit vibration when drilling in an unstable mode due to BHA, operating parameter formation, etc.
- **Application Specific Cutters** Research into cutter features like cutter interfaces, chamfer geometry, and polished surfaces has enabled Hughes Christensen to develop specific cutter types that demonstrate optimum performance for specific drilling environments.
- **CFD Hydraulics** Computational Fluid Dynamics is used as a design tool on Genesis bits to ensure optimum cuttings removal and cutter cooling while limiting bit body erosion.
- **Stress Engineered Cutters** Diamond/carbide interface shape is optimized by Finite Element Analysis to disperse residual stresses and increase durability. Cutter aggressiveness and cutter type is adjusted across the face of the bit for the right combination of durability and ROP required by the specific drilling application.
- **Engineered Cutter Placement** Promotes the right combination of durability and ROP by adjusting the aggressiveness of the cutters and the type of cutter across the face of the bit.

### PRODUCT SPECIFICATIONS:



|                                |  |
|--------------------------------|--|
| IADC:                          | M333   |
| Number of Blades:              | 7  |
| Cutter Quantity (Total, Face): | 47, 40                                       |
| Primary Cutter Size            | .529 in (13.4 mm)                            |
| Number of Nozzles:             | 7  |
| Nozzle Type:                   | MSP  |
| Fixed TFA                      | 0 in <sup>2</sup> (0 mm <sup>2</sup> )       |
| Gauge Length                   | 2 in (50.8 mm)                               |
| Junk Slot Area                 | 13.8 in <sup>2</sup> (89.0 cm <sup>2</sup> ) |
| Bit Breaker:                   | N/A  |
| API Pin Connection:            | 4-1/2 API REG                                |
| Makeup Torque:                 |  |
| 5 1/2" Bit Sub                 | 12.5 - 13.7 kft-lb (17.0 - 18.6 kNm)         |
| 5 3/4" Bit Sub                 | 16.5 - 18.0 kft-lb (22.4 - 24.4 kNm)         |
| 6"+ Bit Sub                    | 17.6 - 19.5 kft-lb (23.9 - 26.4 kNm)         |
| Reference Part Number:         | N1097  |
| Status:                        | S  |

### OPERATING RECOMMENDATIONS\*:

|                      |                                   |
|----------------------|-----------------------------------|
| Hydraulic Flow Rate: | 300 - 750 gpm (1150 - 2850 lpm)   |
| Rotation Speed:      | For Rotary and Motor Applications |
| Max. Weight On Bit:  | 36 klb (16 tn or kdaN)            |



Hughes Christensen

© 2002 Hughes Christensen Company

\* The ranges of bit weight and RPM shown are representative of typical operating parameters, but will not necessarily yield optimum bit life or lowest drilling cost. It is not recommended that the upper limits of both weight and RPM be run simultaneously. Contact your local Hughes Christensen representative for recommendations in your area.

Figura 81: Copia della specifica tecnica dello scalpello *Hughes HC407* (*Hughes Christensen*).

# 8 1/2" HH376



- **DIAMOND ENHANCED CUTTING STRUCTURE —**  
The Hedgehog is constructed with substantial larger diamond volume in the critical transition area. Handmade elements contain substantially more diamond volume compared to the previous impregnated designs.
- **“B” CROWN PROFILE —**  
The rounded crown profile provides for equal load distribution across the face of the bit for even wear and long bit life.
- **TSP INNER CONE —**  
TSP cutters are utilized in the inner cone where larger cutters are required. The cone is designed to optimize the transition between the impregnated segments and TSP cutters.

## PRODUCT SPECIFICATIONS:

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <i>IADC Code:</i>           | M841  |
| <i>Total Gage Length</i>    | 3.00"   |
| <i>Gage Length / type 1</i> | 3.00" Natural Diamond 8spc + TSP + Impregnation |
| <i>Total TFA</i>            | 1.43 in <sup>2</sup>                            |
| <i>Junk Slot Area</i>       | 7.9 in <sup>2</sup>                             |
| <i>Face Volume</i>          | 37.8 in <sup>3</sup>                            |
| <i># OF BLD / SGM</i>       | 16  |
| <i>Connection Type</i>      | 4.50" API REG                                   |
| <i>Shipping Weight</i>      | 200 LBS (91 KG)                                 |

## RECOMMENDED OPERATING PARAMETERS: \*

|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| <i>Make Up Torque:</i>        | 17,600 - 19,400 ft-lbs |
| <i>Hydraulic Flow Rate:</i>   | 350-700 gpm            |
| <i>Rotation Speed:</i>        | 200-1200 rpm           |
| <i>Weight on Bit:</i>         | 2,000 - 26,000 lbs     |
| <i>Maximum Weight on Bit:</i> | 33,000 lbs             |

Reference Part Number – R0089



Hughes Christensen

© 1998 Hughes Christensen Proprietary Notice: This information sheet is property of Hughes Christensen and is considered confidential. Written consent must be obtained from Hughes Christensen to reproduce, copy, or use in part or in whole the drawings or information contained on this sheet. The ranges of bit weight and RPM shown are representative of typical operating parameters, but will not necessarily yield optimum bit life or lowest drilling cost. It is not recommended that the upper limits of both weight and RPM be run simultaneously. Contact your local Hughes Christensen representative for recommendations in your area.

Figura 82: Copia della specifica tecnica dello scalpello *Hughes HH376* (*Hughes Christensen*).

All'interno della Piattaforma Apula #3, lo scalpello che ha perforato con le migliori *performance* è lo scalpello  $\beta$ , *Hughes Christensen HH376*, identificato nel *bit record* di *Pozzo C* al n. 35rr, che ha perforato il *MI 2c (rr)* per cui il valore di  $BI_Z$  è il più alto, il valore di  $SE_R$  è tra i più bassi ed il  $CM$  è il più basso.

E' bene ricordare che lo scalpello  $\beta$  ha perforato anche i *MI 2a* e *2b*, per cui si presuppone che sia stato riutilizzato perché non particolarmente usurato come si legge dalla valutazione *IADC* del bit record del pozzo Pozzo C al termine della prima battuta (3732 m): *2-2-BT-C-X-I-NO-CP*. Il  $CM$  dello scalpello  $\beta$  per la battuta *2rr* è stato calcolato con un costo impianto di 50.000 €/giorno ed un costo scalpello pari a zero, essendo un utensile reerun.

La figura seguente mostra lo scalpello  $\beta$ , *best performer* nel pozzo Pozzo C tra gli scalpelli a taglienti fissi con diametro 8-1/2" che hanno perforato la Piattaforma Apula #3, nuovo (a sinistra) e all'uscita della battuta *2 rr*.



Figura 83: *Bit  $\beta$  HH376*, pozzo Pozzo C (Courtesy of Hughes Christensen and Eni-E&P).

Un'ultima analisi può essere fatta studiando la battuta n. 3 della tabella 8 (*MI* da *3a* a *3f*). Osservando i *MI 3b* e *3c* si nota una diminuzione repentina del valore di  $BI_Z$  ed un



corposo aumento di  $SE_R$ . Analizzando i  $MI$  corrispondenti nel  $FDC$  del pozzo Pozzo C, si nota che la composizione litologica è molto simile, i valori di  $WOB$ ,  $RPM$  ed  $HHP$  sono rimasti pressoché costanti mentre la  $ROP$  si dimezza: quella del  $MI 3b$  è di 3 m/h e quella del  $MI 3c$  è di 1,5 m/h. Associando ai valori di  $BI_Z$  ed  $SE_R$  quelli di  $SE_M$  calcolato con l'eq. (45) si ottiene la tabella seguente:

| MI | IADC code | Bit name | Invest. Interval (Top-Bottom) | $BI_Z$ | $SE_R$ (MJ/m <sup>3</sup> ) | $SE_M$ (N/m <sup>2</sup> ) |
|----|-----------|----------|-------------------------------|--------|-----------------------------|----------------------------|
| 3a | M841      | $\gamma$ | 3744 m – 3768 m               | 1,04   | 7574                        | 14,22                      |
| 3b | M841      | $\gamma$ | 3768 m – 3802 m               | 1,33   | 6769                        | 14,18                      |
| 3c | M841      | $\gamma$ | 3802 m – 3825 m               | 0,77   | 13538                       | 14,48                      |
| 3d | M841      | $\gamma$ | 3825 m – 3853 m               | 0,93   | 11410                       | 14,41                      |
| 3e | M841      | $\gamma$ | 3853 m – 3872 m               | 1,05   | 10164                       | 14,36                      |
| 3f | M841      | $\gamma$ | 3872 m – 3954 m               | 0,83   | 11484                       | 14,42                      |

Tabella 16: Risultati del caso in analisi in termini di  $BI_Z$ ,  $SE_R$  e  $SE_M$

La precedente tabella mostra che, passando dal  $MI 3b$  al  $MI 3c$ , anche  $SE_M$  aumenta da 14,18 a 14,48. Prima e dopo i  $MI 3b$  e  $3c$  i valori di  $SE_M$  sono molto più simili tra .

In questo modo, tenendo presente che una diminuzione del valore di  $BI_Z$  (ed un aumento del valore di  $SE_R$ ) indicano un peggioramento delle *performance* dello scalpello, un aumento del valore  $SE_M$  è sintomo di una variazione della perforabilità della formazione, si ritiene idoneo pensare che tra i  $MI 3a$  e  $3c$  ci sia stata una variazione delle caratteristiche della roccia che, come effetto, abbia portato ad un dimezzamento della velocità di avanzamento.

Questo è ulteriore esempio di come si riesce, utilizzando il  $FDC$  ampliato, ad integrare in modo funzionale le valutazioni effettuate con il *Bit Index*, l'energia specifica ed il  $SE_M$ .

## 8.6 Il calcolo $BI_{RUN}$ applicato al FDC

In questo paragrafo è studiata la valutazione delle *performance* degli scalpelli che hanno perforato cinque pozzi profondi catalogati nel FDC: Pozzo C, Pozzo A, Pozzo E, Pozzo Be Pozzo F, tutti perforati in Val d'Agri.

Le *performance* sono valutate con l'ausilio dell'indice  $BI_{RUN}$  calcolato con l'eq. (50).

Nella prima parte di questo studio sono testate le *performance* di scalpelli a taglienti mobili con diametro 17-1/2", 16" e 14-3/4".

I *benchmark* scelti per il calcolo del *Bit Index* ed i costi per la valutazione del costo/metro, sono quelli identificati nel paragrafo 8.4.

Il calcolo del  $BI$  è svolto utilizzando i seguenti pesi:  $C_{ROP} = 0.5$ ,  $C_H = 0.3$ ,  $C_{TQ} = 0.1$ ,  $C_{DG} = 0.1$ .

La tabella successiva identifica le battute degli scalpelli a taglienti mobili con diametro 17-1/2", che hanno perforato la formazione *Flysch* Galestrino: il *best performer* è l'utensile n. 2, che ha il più alto valore di  $BI_{RUN}$  ed il più basso valore di costo/metro.

| <i>Bit Number &amp; Well</i> | <i>IADC code</i> | <i>Top (m)</i> | <i>Bottom (m)</i> | <i>Interval drilled (m)</i> | <i>Drilling time (h)</i> | $BI_{RUN}$ | <i>CM/100 (€/m)</i> |
|------------------------------|------------------|----------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|------------|---------------------|
| 1 (Pozzo C)                  | 435              | 475            | 693               | 218                         | 35,3                     | 9,57       | 5,43                |
| 2 (Pozzo C)                  | 425              | 360            | 695               | 335                         | 23,4                     | 11,88      | 3,04                |
| 3 (Pozzo C)                  | 435              | 695            | 1383              | 688                         | 72,7                     | 9,95       | 3,05                |

Tabella 17: *performance* degli scalpelli a taglienti mobili con diametro 17-1/2", che hanno perforato la formazione *Flysch* Galestrino.

La tabella successiva identifica le battute degli scalpelli a taglienti mobili con diametro 14-3/4" che hanno perforato la formazione *Flysch* Galestrino: il *best performer* è l'utensile n. 5, che ha il più alto valore di  $BI_{RUN}$  ed il più basso valore di costo/metro.

| <i>Bit Number &amp; Well</i> | <i>IADC code</i> | <i>Top (m)</i> | <i>Bottom (m)</i> | <i>Interval drilled (m)</i> | <i>Drilling time (h)</i> | <i>BI<sub>RUN</sub></i> | <i>CM/100 (€/m)</i> |
|------------------------------|------------------|----------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1 (Pozzo C)                  | 435              | 1575           | 1645              | 70                          | 20,0                     | 0,81                    | 7,37                |
| 2 (Pozzo C)                  | 435              | 1645           | 1885              | 240                         | 44,7                     | 4,57                    | 6,15                |
| 3 (Pozzo C)                  | 445              | 1885           | 2072              | 187                         | 48,8                     | 2,10                    | 8,22                |
| 4 (Pozzo C)                  | 435              | 1383           | 1446              | 63                          | 10,5                     | 3,83                    | 11,61               |
| 5 (Pozzo C)                  | 435              | 1446           | 1764              | 318                         | 29,6                     | 6,33                    | 3,62                |
| 6 (Pozzo C)                  | 435              | 1764           | 1909              | 145                         | 48,3                     | 1,29                    | 10,7                |
| 7 (Pozzo C)                  | 447              | 1909           | 1989              | 80                          | 32,0                     | 1,06                    | 15,21               |

Tabella 18: *performance* degli scalpelli a taglienti mobili con diametro 14-3/4", che hanno perforato la formazione *Flysh* Galestrino.

I medesimi risultati sono ottenuti per scalpelli a taglienti fissi, con diametro 8-1/2", che hanno perforato la formazione Piattaforma Apula.

| <i>Bit Number &amp; Well</i> | <i>IADC code</i> | <i>Top (m)</i> | <i>Bottom (m)</i> | <i>Interval drilled (m)</i> | <i>Drilling time (h)</i> | <i>BI<sub>RUN</sub></i> | <i>CM/100 (€/m)</i> |
|------------------------------|------------------|----------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1 (Pozzo A)                  | S423             | 3180           | 3475              | 296                         | 39,4                     | 1,49                    | 4,94                |
| 2 (Pozzo C)                  | M333             | 3055           | 3118              | 63                          | 19,5                     | 0,78                    | 16,17               |
| 3 (Pozzo C)                  | M624             | 3251           | 3370              | 119                         | 33,9                     | 0,50                    | 11,23               |
| 4 (Pozzo C)                  | M624             | 3370           | 3417              | 47                          | 23,5                     | 0,20                    | 23,39               |
| 5 (Pozzo C)                  | M842             | 3500           | 3561              | 61                          | 30,5                     | 0,44                    | 23,91               |
| 6 (Pozzo C)                  | M842             | 3615           | 3732              | 117                         | 52,5                     | 1,27                    | 16,48               |
| 7 (Pozzo C)                  | M841             | 3744           | 3954              | 210                         | 103,2                    | 1,09                    | 14,28               |
| 8 (Pozzo C)                  | M482             | 3966           | 4010              | 44                          | 14,7                     | 1,41                    | 26,36               |

Tabella 19: *performance* degli scalpelli a taglienti mobili con diametro 8-1/2", che hanno perforato la formazione Piattaforma Apula.

La stessa metodologia di valutazione è stata applicata a scalpelli a taglienti mobili, con diametro 16" e 14-3/4", che hanno perforato le Unità Irpine. In questo caso il *best performer* è l'utensile cui è associato il minor costo/metro ed il secondo più alto valore di *BI<sub>RUN</sub>*.

| Bit diam. | Bit Num. & Well | IADC code | Top (m) | Bottom (m) | Int. drilled (m) | Drill. time (h) | $BI_{RUN}$ | CM/100 (€/m) |
|-----------|-----------------|-----------|---------|------------|------------------|-----------------|------------|--------------|
| 16"       | 1 (Pozzo A)     | 415M      | 1506    | 1664       | 158              | 16,7            | 1,38       | 5,77         |
|           | 2 (Pozzo B)     | 435       | 1178    | 1452       | 274              | 65,1            | 0,92       | 6,95         |
|           | 3 (Pozzo B)     | 435       | 1452    | 1639       | 187              | 63,1            | 0,88       | 10,02        |
| 14-3/4"   | 4 (Pozzo C)     | 445       | 2072    | 2102       | 30               | 10,0            | 2,13       | 8,22         |
|           | 5 (Pozzo C)     | 445       | 2102    | 2376       | 274              | 50,8            | 0,76       | 5,97         |
|           | 6 (Pozzo C)     | 445       | 2376    | 2420       | 44               | 7,3             | 0,53       | 12,39        |

Tabella 20: *performance* degli scalpelli a taglienti mobili con diametro 16" e 14-3/4", che hanno perforato le Unità Iripine.

Nella seconda parte di questo studio sono state confrontate le *performance* degli scalpelli sia a taglienti mobili che fissi che hanno perforato le Unità Iripine.

Anche in questo caso, i *benchmark* scelti per il calcolo del *Bit Index* ed i costi per la valutazione del costo/metro, sono quelli identificati nel paragrafo 8.4; il calcolo del *BI* è svolto utilizzando i seguenti pesi:  $C_{ROP} = 0.5$ ,  $C_H = 0.3$ ,  $C_{TQ} = 0.1$ ,  $C_{DG} = 0.1$ .

La tabella successiva identifica le battute degli scalpelli (da 1 a 12 a taglienti mobili e da 13 a 21 a taglienti fissi) 12-1/4" che hanno perforato le Unità Iripine: il *best performer* è l'utensile n. 15, che ha il più alto valore di  $BI_{RUN}$  ed il più basso valore di costo/metro.

| Bit type      | Bit Num. & Well | IADC code | Top (m) | Bottom (m) | Int. drilled (m) | Drill. time (h) | $BI_{RUN}$ | CM/100 (€/m) |
|---------------|-----------------|-----------|---------|------------|------------------|-----------------|------------|--------------|
| Roller cones  | 1 (Pozzo A)     | 517       | 2309    | 2518       | 209              | 36,5            | 1,20       | 6,12         |
|               | 2 (Pozzo B)     | 445       | 2981    | 3073       | 92               | 23,5            | 0,36       | 11,36        |
|               | 3 (Pozzo C)     | 517       | 3037    | 3381       | 344              | 48,4            | 0,93       | 4,58         |
|               | 4 (Pozzo C)     | 517M      | 2802    | 2962       | 160              | 55,7            | 0,58       | 10,64        |
|               | 5 (Pozzo C)     | 517       | 2879    | 3012       | 133              | 41,1            | 0,68       | 10,58        |
|               | 6 (Pozzo C)     | 517       | 3099    | 3165       | 66               | 26,4            | 0,27       | 16,85        |
|               | 7 (Pozzo D)     | 447       | 1710    | 1968       | 258              | 32,1            | 1,43       | 4,45         |
|               | 8 (Pozzo D)     | 445       | 1968    | 2072       | 104              | 20,8            | 0,69       | 8,84         |
|               | 9 (Pozzo D)     | 447       | 2072    | 2285       | 213              | 41,3            | 0,99       | 6,40         |
|               | 10 (Pozzo D)    | 517       | 2734    | 2838       | 104              | 31,9            | 0,42       | 11,57        |
|               | 11 (Pozzo D)    | 517       | 2838    | 3009       | 171              | 57,0            | 0,44       | 10,17        |
|               | 12 (Pozzo D)    | 517       | 3009    | 3161       | 152              | 47,0            | 0,52       | 10,14        |
| Fixed cutters | 13 (Pozzo A)    | M432      | 1951    | 2016       | 65               | 20,9            | 0,95       | 17,63        |

| Bit type | Bit Num. & Well | IADC code | Top (m) | Bottom (m) | Int. drilled (m) | Drill. time (h) | BI <sub>RUN</sub> | CM/100 (€/m) |
|----------|-----------------|-----------|---------|------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------|
|          | 14 (Pozzo A)    | M322      | 2016    | 2309       | 293              | 38,3            | 3,38              | 5,22         |
|          | 15 (Pozzo B)    | M323      | 1639    | 2239       | 600              | 45,7            | 3,52              | 2,80         |
|          | 16 (Pozzo B)    | M323      | 2239    | 2524       | 285              | 58,6            | 1,78              | 6,90         |
|          | 17 (Pozzo B)    | M323      | 2524    | 2672       | 148              | 59,2            | 0,75              | 13,44        |
|          | 18 (Pozzo B)    | M323      | 2672    | 2859       | 187              | 58,6            | 0,98              | 10,64        |
|          | 19 (Pozzo B)    | M323      | 2859    | 2981       | 122              | 51,8            | 0,86              | 15,22        |
|          | 20 (Pozzo C)    | S222      | 3012    | 3099       | 87               | 25,7            | 0,76              | 15,19        |
|          | 21 (Pozzo C)    | M423      | 3165    | 3210       | 45               | 30,0            | 0,20              | 31,52        |

Tabella 21: analisi delle *performance* di scalpelli a taglienti mobili e fissi con diametro 12-1/4", che hanno perforato le Unità Irpine.

La figura successiva è la rappresentazione grafica della tabella descritta sopra e riporta, sull'asse delle ascisse i numeri delle battute degli scalpelli (da 1 a 12 a taglienti mobili e da 13 a 21 a taglienti fissi) e su quello delle ordinate, i valori di BI<sub>RUN</sub> e CM/1000. Si ricorda che il *Bit Index* è adimensionale.

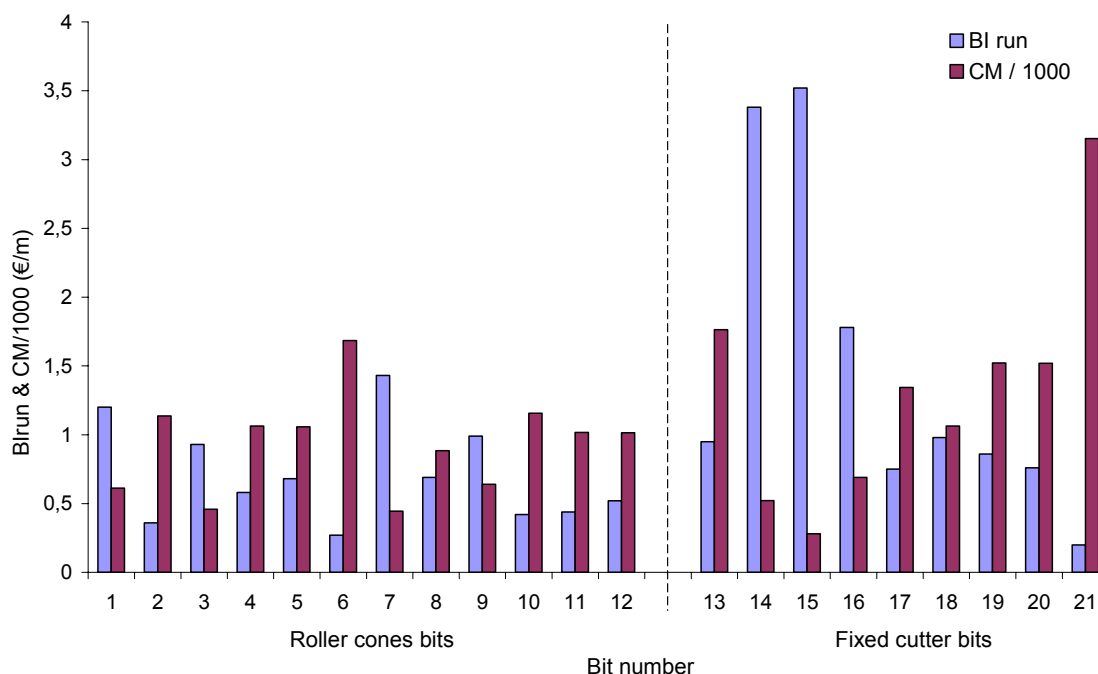


Figura 84: analisi delle *performance* di scalpelli a taglienti mobili e fissi con diametro 12-1/4", che hanno perforato le Unità Irpine.

In generale, in termini di Bit Index, i valori dei  $BI_{RUN}$  degli scalpelli a taglienti fissi sono sistematicamente più alti di quelli a taglienti mobili: le *performance* degli scalpelli a taglienti fissi sono, in questo caso, migliori di quelle degli scalpelli a taglienti mobili. Questa valutazione non è evidente studiando il solo valore del costo/metro.

### **8.7 Studi sui coefficienti parametrici nella valutazione delle *performance* tramite il $BI_{RUN}$ applicato al FDC**

In questo paragrafo è studiata la valutazione delle *performance* degli scalpelli che hanno perforato cinque pozzi profondi catalogati nel FDC: Pozzo C, Pozzo A, Pozzo E, Pozzo Be Pozzo F, tutti perforati in Val d'Agri.

Le *performance* sono valutate con l'ausilio dell'indice  $BI_{RUN}$  calcolato con l'eq. (50).

Lo studio è concentrato sulla valutazione delle *performance* di scalpelli a taglienti mobili e fissi, con diametro 12-1/4", che hanno perforato le Unità Irpine. In particolare si cerca di capire le variazioni di  $BI_{RUN}$  al variare dei coefficienti parametrici (pesi) necessari ad indirizzare la valutazione delle *performance*.

I *benchmark* scelti per il calcolo del *Bit Index* ed i costi per la valutazione del costo/metro, sono quelli identificati nel paragrafo 8.3.

Il calcolo del  $BI$  è svolto utilizzando tre differenti gruppi di pesi: (a)  $C_{ROP} = 0.8$ ,  $C_H = 0.1$ ,  $C_{TQ} = 0.05$ ,  $C_{DG} = 0.05$ , (b)  $C_{ROP} = 0.5$ ,  $C_H = 0.3$ ,  $C_{TQ} = 0.1$ ,  $C_{DG} = 0.1$ , (c)  $C_{ROP} = 0.1$ ,  $C_H = 0.8$ ,  $C_{TQ} = 0.05$ ,  $C_{DG} = 0.05$ .

Un peso elevato associato ad una variabile dipendente del calcolo del *Bit Index*, è sintomo di un interesse nell'individuare gli scalpelli che hanno avuto una buona *performance* associata a quella variabile.

Tramite il gruppo dei pesi indicato con *a* si cerca d'identificare gli utensili che hanno un'alta velocità di avanzamento rispetto alla lunghezza dell'intervallo perforato, all'elevata usura ed all'elevata torsione, con il gruppo *b* si identificano gli scalpelli che

hanno buone *performance* in termini sia di velocità di avanzamento che d'intervallo perforato, con il gruppo *c* si “premano” maggiormente gli utensili che hanno perforato un lungo intervallo.

La tabella successiva identifica le battute degli scalpelli (da 1 a 12 a taglienti mobili e da 13 a 21 a taglienti fissi) 12-1/4” che hanno perforato le Unità Iripine: il *best performer* è l’utensile n. 15, che ha il più alto valore di  $BI_{RUN}$  calcolato con i pesi del gruppo (*a*) ( $C_{ROP} = 0.8$ ,  $C_H = 0.1$ ,  $C_{TQ} = 0.05$ ,  $C_{DG} = 0.05$ ) ed il più basso valore di costo/metro.

| Bit type      | Bit Num. & Well | IADC code | Top (m) | Bottom (m) | Int. drilled (m) | Drill. time (h) | $BI_{RUN}$ | CM/100 (€/m) |
|---------------|-----------------|-----------|---------|------------|------------------|-----------------|------------|--------------|
| Roller cones  | 1 (Pozzo A)     | 517       | 2309    | 2518       | 209              | 36,5            | 1,09       | 6,12         |
|               | 2 (Pozzo B)     | 445       | 2981    | 3073       | 92               | 23,5            | 0,39       | 11,36        |
|               | 3 (Pozzo C)     | 517       | 3037    | 3381       | 344              | 48,4            | 0,93       | 4,58         |
|               | 4 (Pozzo C)     | 517M      | 2802    | 2962       | 160              | 55,7            | 0,51       | 10,64        |
|               | 5 (Pozzo C)     | 517       | 2879    | 3012       | 133              | 41,1            | 0,6        | 10,58        |
|               | 6 (Pozzo C)     | 517       | 3099    | 3165       | 66               | 26,4            | 0,33       | 16,85        |
|               | 7 (Pozzo D)     | 447       | 1710    | 1968       | 258              | 32,1            | 1,66       | 4,45         |
|               | 8 (Pozzo D)     | 445       | 1968    | 2072       | 104              | 20,8            | 0,87       | 8,84         |
|               | 9 (Pozzo D)     | 447       | 2072    | 2285       | 213              | 41,3            | 1,06       | 6,40         |
|               | 10 (Pozzo D)    | 517       | 2734    | 2838       | 104              | 31,9            | 0,48       | 11,57        |
|               | 11 (Pozzo D)    | 517       | 2838    | 3009       | 171              | 57,0            | 0,43       | 10,17        |
|               | 12 (Pozzo D)    | 517       | 3009    | 3161       | 152              | 47,0            | 0,5        | 10,14        |
| Fixed cutters | 13 (Pozzo A)    | M432      | 1951    | 2016       | 65               | 20,9            | 1,06       | 17,63        |
|               | 14 (Pozzo A)    | M322      | 2016    | 2309       | 293              | 38,3            | 3,48       | 5,22         |
|               | 15 (Pozzo B)    | M323      | 1639    | 2239       | 600              | 45,7            | 3,74       | 2,80         |
|               | 16 (Pozzo B)    | M323      | 2239    | 2524       | 285              | 58,6            | 1,72       | 6,90         |
|               | 17 (Pozzo B)    | M323      | 2524    | 2672       | 148              | 59,2            | 0,73       | 13,44        |
|               | 18 (Pozzo B)    | M323      | 2672    | 2859       | 187              | 58,6            | 0,95       | 10,64        |
|               | 19 (Pozzo B)    | M323      | 2859    | 2981       | 122              | 51,8            | 0,73       | 15,22        |
|               | 20 (Pozzo C)    | S222      | 3012    | 3099       | 87               | 25,7            | 0,93       | 15,19        |
|               | 21 (Pozzo C)    | M423      | 3165    | 3210       | 45               | 30,0            | 0,23       | 31,52        |

Tabella 22: analisi delle *performance* di scalpelli a taglienti mobili e fissi con diametro 12-1/4”, che hanno perforato le Unità Iripine,  $BI_{RUN}$  calcolato con i pesi del gruppo (*a*) ( $C_{ROP} = 0.8$ ,  $C_H = 0.1$ ,  $C_{TQ} = 0.05$ ,  $C_{DG} = 0.05$ ).

La figura successiva è la rappresentazione grafica della tabella descritta sopra e riporta, sull'asse delle ascisse i numeri delle battute degli scalpelli (da 1 a 12 a taglienti mobili e da 13 a 21 a taglienti fissi) e su quello delle ordinate, i valori di  $BI_{RUN}$  e  $CM/1000$ . Si ricorda che il *Bit Index* è adimensionale.

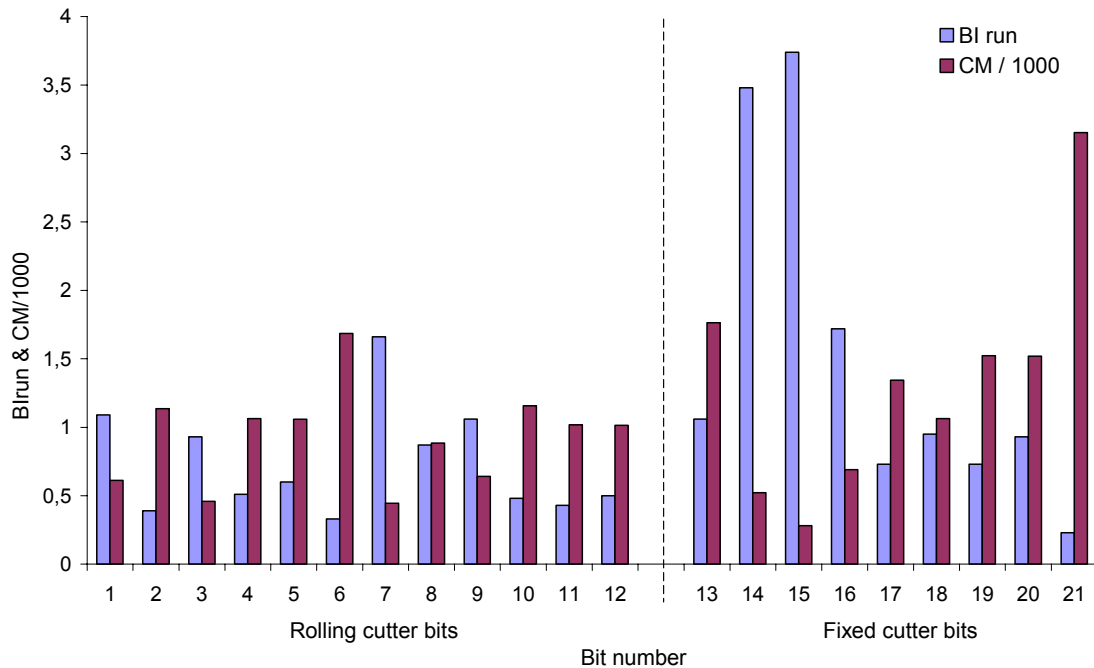


Figura 85: analisi delle *performance* di scalpelli a taglienti mobili e fissi con diametro 12-1/4", che hanno perforato le Unità Irpine,  $BI_{RUN}$  calcolato con i pesi del gruppo (a) ( $C_{ROP} = 0.8$ ,  $C_H = 0.1$ ,  $C_{TQ} = 0.05$ ,  $C_{DG} = 0.05$ ).

La tabella 21 identifica le battute degli scalpelli (da 1 a 12 a taglienti mobili e da 13 a 21 a taglienti fissi) 12-1/4" che hanno perforato le Unità Irpine: il *best performer* è l'utensile n. 15, che ha il più alto valore di  $BI_{RUN}$  calcolato con i pesi del gruppo (b) ( $C_{ROP} = 0.5$ ,  $C_H = 0.3$ ,  $C_{TQ} = 0.1$ ,  $C_{DG} = 0.1$ ), ed il più basso valore di costo/metro.

La tabella successiva identifica le battute degli scalpelli (da 1 a 12 a taglienti mobili e da 13 a 21 a taglienti fissi) 12-1/4" che hanno perforato le Unità Irpine: il *best*



*performer* è l'utensile n. 9, che ha il più alto valore di  $BI_{RUN}$  calcolato con i pesi del gruppo (c) ( $C_{ROP} = 0.1$ ,  $C_H = 0.8$ ,  $C_{TQ} = 0.05$ ,  $C_{DG} = 0.05$ ).

| <i>Bit type</i>      | <i>Bit Num. &amp; Well</i> | <i>IADC code</i> | <i>Top (m)</i> | <i>Bottom (m)</i> | <i>Int. drilled (m)</i> | <i>Drill. time (h)</i> | $BI_{RUN}$ | <i>CM/100 (€/m)</i> |
|----------------------|----------------------------|------------------|----------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------|---------------------|
| <i>Roller cones</i>  | 1 (Pozzo A)                | 517              | 2309           | 2518              | 209                     | 36,5                   | 0,44       | 6,12                |
|                      | 2 (Pozzo B)                | 445              | 2981           | 3073              | 92                      | 23,5                   | 0,1        | 11,36               |
|                      | 3 (Pozzo C)                | 517              | 3037           | 3381              | 344                     | 48,4                   | 1,35       | 4,58                |
|                      | 4 (Pozzo C)                | 517M             | 2802           | 2962              | 160                     | 55,7                   | 0,39       | 10,64               |
|                      | 5 (Pozzo C)                | 517              | 2879           | 3012              | 133                     | 41,1                   | 0,29       | 10,58               |
|                      | 6 (Pozzo C)                | 517              | 3099           | 3165              | 66                      | 26,4                   | 0,11       | 16,85               |
|                      | 7 (Pozzo D)                | 447              | 1710           | 1968              | 258                     | 32,1                   | 0,85       | 4,45                |
|                      | 8 (Pozzo D)                | 445              | 1968           | 2072              | 104                     | 20,8                   | 0,73       | 8,84                |
|                      | 9 (Pozzo D)                | 447              | 2072           | 2285              | 213                     | 41,3                   | 1,61       | 6,40                |
|                      | 10 (Pozzo D)               | 517              | 2734           | 2838              | 104                     | 31,9                   | 0,31       | 11,57               |
|                      | 11 (Pozzo D)               | 517              | 2838           | 3009              | 171                     | 57,0                   | 0,27       | 10,17               |
|                      | 12 (Pozzo D)               | 517              | 3009           | 3161              | 152                     | 47,0                   | 0,3        | 10,14               |
| <i>Fixed cutters</i> | 13 (Pozzo A)               | M432             | 1951           | 2016              | 65                      | 20,9                   | 0,59       | 17,63               |
|                      | 14 (Pozzo A)               | M322             | 2016           | 2309              | 293                     | 38,3                   | 1,1        | 5,22                |
|                      | 15 (Pozzo B)               | M323             | 1639           | 2239              | 600                     | 45,7                   | 0,87       | 2,80                |
|                      | 16 (Pozzo B)               | M323             | 2239           | 2524              | 285                     | 58,6                   | 0,47       | 6,90                |
|                      | 17 (Pozzo B)               | M323             | 2524           | 2672              | 148                     | 59,2                   | 0,22       | 13,44               |
|                      | 18 (Pozzo B)               | M323             | 2672           | 2859              | 187                     | 58,6                   | 0,27       | 10,64               |
|                      | 19 (Pozzo B)               | M323             | 2859           | 2981              | 122                     | 51,8                   | 0,3        | 15,22               |
|                      | 20 (Pozzo C)               | S222             | 3012           | 3099              | 87                      | 25,7                   | 0,26       | 15,19               |
|                      | 21 (Pozzo C)               | M423             | 3165           | 3210              | 45                      | 30,0                   | 0,1        | 31,52               |

Tabella 23: analisi delle *performance* di scalpelli a taglienti mobili e fissi con diametro 12-1/4", che hanno perforato le Unità Iripine,  $BI_{RUN}$  calcolato con i pesi del gruppo (c) ( $C_{ROP} = 0.1$ ,  $C_H = 0.8$ ,  $C_{TQ} = 0.05$ ,  $C_{DG} = 0.05$ ).

La figura successiva è la rappresentazione grafica della tabella descritta sopra e riporta, sull'asse delle ascisse i numeri delle battute degli scalpelli (da 1 a 12 a taglienti mobili e da 13 a 21 a taglienti fissi) e su quello delle ordinate, i valori di  $BI_{RUN}$  e  $CM/1000$ . Si ricorda che il *Bit Index* è adimensionale.

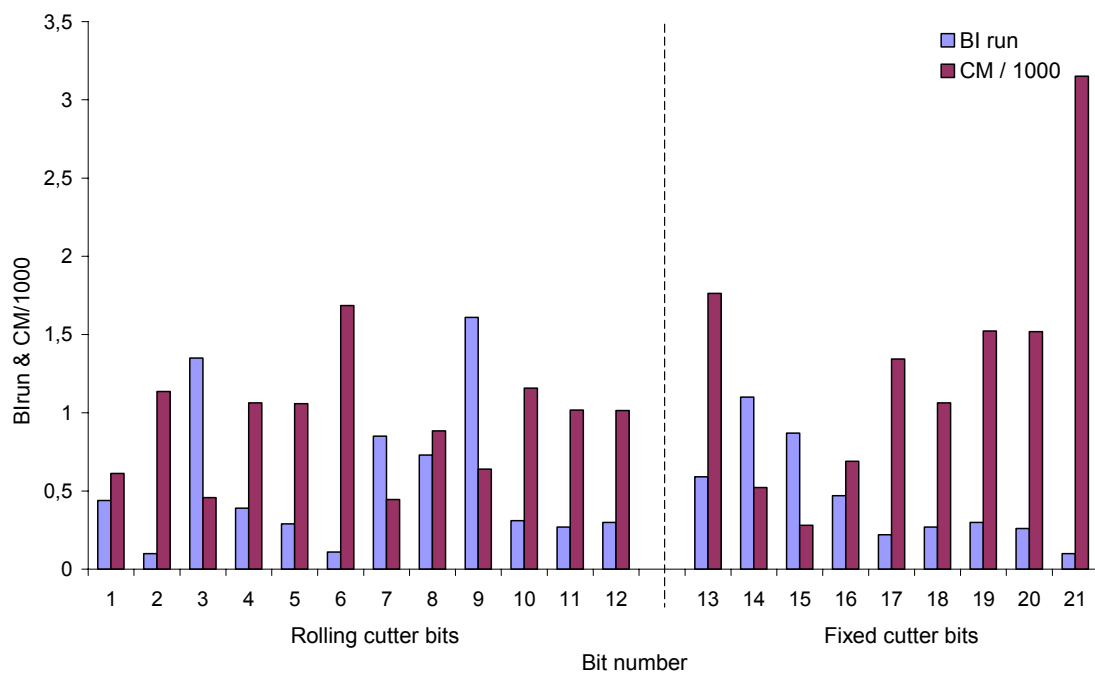


Figura 86: analisi delle *performance* di scalpelli a taglienti mobili e fissi con diametro 12-1/4", che hanno perforato le Unità Irpine,  $BI_{RUN}$  calcolato con i pesi del gruppo (c) ( $C_{ROP} = 0.1$ ,  $C_H = 0.8$ ,  $C_{TQ} = 0.05$ ,  $C_{DG} = 0.05$ ).

Dall'analisi delle tabelle 21, 22, 23 si osserva che, cambiando i pesi nel calcolo del *Bit Index*, variano i valori assoluti di  $BI_{RUN}$ : il *best performer* calcolato con i pesi del gruppo (a) è uguale a quello del identificato con i pesi del gruppo (b) (bit n. 15, *fixed Cutter*), ma è differente a quello trovato con i pesi del gruppo (c) (bit n. 9, *rolling cutter*).

In questo caso si evidenzia l'importanza dell'utilizzo dei pesi: la scelta delle costanti parametriche deve poter indirizzare verso la/le variabile/i dipendente ( $ROP$ ,  $H$ ,  $TQ$ ,  $DG$ ) di maggiore interesse nel processo di valutazione delle *performance*.

## PARTE IX: RISULTATI E CRITICITA' DEL METODO

Con quest'ultima parte, si cercheranno di definire le attività svolte ed i risultati raggiunti, evidenziando le criticità emerse durante le fasi del Progetto *Bit Performance*.

La presente relazione riporta un quadro generale del lavoro svolto durante il Progetto *Bit Performance*. In particolare, durante il Progetto, sono state svolte le seguenti attività:

- 1) studio dello stato dell'arte per quanto riguarda la valutazione delle *performance* degli scalpelli, la loro scelta e l'offerta del mercato,
- 2) sviluppo del modello *Bit Index & Economic Index*: partendo da una metodologia parzialmente conosciuta in bibliografia, sono stati sviluppati i due indici indicati sopra, che permettono di associare, ad ogni utensile disceso in pozzo, una coppia di valori numerici che ne identificano le *performance*.
- 3) Ampliamento del *FDC* geologico con i parametri necessari al calcolo del *Bit Index*, dell'*Economic Index*, della *Specific Energy (SE)* e del costo/metro (*CM*);
- 4) implementazione del *database FDC*;
- 5) sviluppo del Sistema di Supporto Decisionale *Bit Performance (BPE)* che implementa il modello *Bit Index & Economic Index* ed il *database FDC*,

Lo studio dello stato dell'arte è stato sviluppato nell'ottica di comparare ciò che il mercato propone con ciò che è stato fatto per quanto riguarda la valutazione delle *performance* degli scalpelli. Si può affermare che le tecniche con cui sono sviluppati e costruiti i *bit* è il principale elemento d'interesse per le case produttrici, mentre la valutazione delle *performance* è fatta con metodologie classiche come il costo/metro e la valutazione della velocità di avanzamento. In riferimento al punto (2) di cui sopra, nel Progetto *Bit Performance* sono stati sviluppati il *Bit Index* e l'*Economic Index* che, differenza degli indici di valutazione delle *performance* degli scalpelli utilizzati fino ad ora (ad es. costo/metro, ecc.), considerano un elevato numero di parametri significativi e permette d'indirizzare la valutazione in funzione delle esigenze dell'utente (si vedano i casi studiati nel capitolo precedente).

In base al punto (3) elencato sopra, una prima criticità emersa durante il Progetto consiste nella possibilità di disporre dei *file* che contengono parametri per l'ampliamento del *FDC*: allo stato attuale, una consistente parte dei pozzi della Val d'Agri che erano stati selezionati per l'applicazione del *Bit Index*, risulta non ancora completata soprattutto per la mancanza di reperibilità dei cosiddetti "*log\_vs\_depth*" (registrazioni in riferimento alla profondità, ogni 25 cm o 1 m, di parametri come *TVD*, *WOB*, *RPM*, ecc.). Il problema della mancanza dei valori numerici di parametri fondamentali per un numero elevato di pozzi, implica la possibilità di studiare l'applicazione del *Bit Index* e dell'*Economic Index* solo su alcuni (ad es. Pozzo A, Pozzo C, Monte Alpi, ecc.), ma comunque significativi per la tipologia degli scalpelli utilizzati, per le condizioni di perforazione e le formazioni perforate.

La disponibilità di questi pozzi ha permesso di applicare il *Bit Index*, prima sul singolo *MI* del *FDC*, poi sull'intera battuta, studiando e sviluppando anche una valutazione della perforabilità della formazione (*SE<sub>M</sub>*).

In base al punto (4) dell'elenco precedente, il *FDC* nasce come un catalogo implementato all'interno di un foglio di calcolo commerciale. Durante lo svolgimento del Progetto, si costruisce un *database FDC*, che permette di considerare ulteriori parametri (es. composizione della *BHA*, ecc.), che non rientrano materialmente nel calcolo degli indici *BI* ed *EI*, ma definiscono maggiormente le condizioni al contorno nel processo di valutazione delle *performance* degli scalpelli.

Il *database FDC* è costruito con una rigida logica definita da una procedura operativa e da *routine* per il caricamento dei dati e per il calcolo degli indici. Il *database FDC* è costruito "raggruppando" più parametri che derivano da documenti differenti (es. *Master log*, "*log\_vs\_depth*", *bit record*, ecc.) ed ognuno possiede una precisione funzionale agli scopi principali per cui è redatto. Una criticità emersa riguarda "l'unione" di questi documenti: il sistema automatico implementato nel *database FDC* rileva anche piccoli errori (che la mente umana, in un processo "a mano" tende a tralasciare), per cui risulta complicata l'operazione di completo popolamento delle celle del *database*. Per ridurre questa criticità è stato studiato un sistema d'integrazione dei

documenti di pozzo prima del loro caricamento nel *database* (es. il FDC geologico è attualmente costruito non solo con il *Master Log*, ma anche considerando il bit record).

In ultimo è stato costruito un Sistema di Supporto Decisionale che, utilizzando il *database FDC* permette all'utente di essere indirizzato verso una scelta tecnica ed economica il più oggettiva possibile in fase di pianificazione di un pozzo e di valutazione delle *performance* degli scalpelli discesi.

Il *BPE* è volutamente costruito anche per valutare l'efficacia delle proposte Scalpelli delle Compagnie di Servizio

Il *database FDC* ed il *BPE* sono sistemi "dinamici": il *database FDC* deve essere continuamente alimentato con pozzi recentemente perforati per mantenere efficaci i risultati che scaturiscono dalle analisi prodotte dal *BPE*.

I modelli *BI* ed *EI* sono "aperti", cioè pronti ad "accogliere" ulteriori parametri rispetto a quelli già considerati (evidenziabili, per esempio, studiando ancora più approfonditamente il *FDC*).

Alla luce dei risultati ottenuti e delle criticità emerse, si ritiene idoneo indicare ulteriori possibili attività di ricerca: (a) popolare il *database FDC* con ulteriori dati dei campi del *Kazakhstan*, area in espansione in cui il *BPE* potrebbe risultare utile, (b) eseguire indagini di *data mining* per ricercare ulteriori relazioni utili alla suddivisione geomeccanica dei *minimum interval* in funzione dei nuovi parametri con cui è popolato il *FDC*, (c) studiare i modelli *Bit Index* ed *Economic Index* in funzione delle due attività descritte sopra.

In riferimento al punto (a), essendo la zona del Mar Caspio in forte espansione, la valutazione delle *performance* e la selezione degli scalpelli di perforazione rappresenta un aspetto fondamentale nel processo di ottimizzazione della perforazione. La maggior parte dei dati di pozzo che popolano il *FDC* proviene da formazioni geologiche della Val d'Agri: allo stato attuale svariati pozzi perforati dal 1992 al 2005 in questa zona sono già stati caricati o in fase di caricamento nel *database FDC*. I dati dei pozzi del *Kazakhstan* che popolano il *FDC* sono molti meno di quelli italiani. In questi mesi di Progetto il *FDC* si è dimostrato un catalogo prezioso per il funzionamento del *SSDBP*,

per cui si ritiene idoneo poter proseguire nella compilazione del *FDC* per i campi del *Kazakhstan* perché il BPE possa essere utilizzato anche per le attività del Mar Caspio.

In riferimento al punto (b), l'utilizzo di tecniche di *data mining* permette lo studio di eventuali e possibili correlazioni tra i parametri classificati in un *database*. Il *FDC* è un *database* che classifica informazioni di diversa natura (parametri geologici e litologici con dati drilling) ed il dettaglio dei *MI* permette di disporre di informazioni particolarmente adatte e fruibili per gli scopi del Progetto. Approfondire la conoscenza delle correlazioni tra le tipologie di dati classificati permetterebbe di identificare il dettaglio dei *MI* non solo tramite la "sezione" geologica del *FDC*, ma sfruttando anche i dati cosiddetti *drilling*, di evidenziare correlazioni tra le tipologie di dati che compongono i modelli *BI* ed *EI* con nuovi parametri classificati nel *FDC* (es. il tempo di transito del *log* sonico, l'inclinazione del foro, la composizione della *BHA*, ecc.) che potrebbero essere considerati in un possibile *upgrade* dei modelli stessi.

## BIBLIOGRAFIA

1. Langston, J.W.: "A Method of Utilizing Existing Information to Optimize Drilling Procedures", paper SPE 1262, Journal of Petroleum Technology, 677-686, June 1966.
2. Hightower, W.J.: "Proper Selection of Drill Bits and Their Use", paper SPE 794, Mechanical Engineering Aspects of Drilling-Production Symposium, 1964.
3. Galle, E.M., Woods, H.B.: "Best constant Weight and Rotary Speed for rotary Rock Bits", Spring Meeting of the Pacific Coast District, API Division of Production, 1963.
4. Vitter, Jr., A. L., : "Bit *performance*", paper SPE 4646, Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, 1973
5. Raynal, J.C., Gstalder, S.A., Sagot, A.M., Muckleroy, J.A.: "Organization of Field Tests and Evaluation of Tricone Bit *performance* Using Statistical Analysis and Sonic Logs", paper SPE 2916, Journal Petroleum Tech., 1971
6. Bilgesu, H.I. et al.: "A New Approach for Drill Bit Selection", paper SPE 65618, SPE Eastern Regional Meeting, Morgantown, 2000.
7. Bilgesu, H.I. et al.: "An Unconventional Approach for Drill-Bit Selection", paper SPE 68089, SPE Middle East Oil Show, Bahrain, 2001
8. Rabia, H. and Farrelly, M.: "A New Approach to Drill Bit Selection", paper SPE 15894, SPE European Petroleum Conference, London, 1986.
9. Teale, R.; "The Concept of Specific Energy in Rock Drilling", Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Vol.2, pp 57-73, 1964.
10. Rabia, H.: "Specific Energy as a Criterion for Bit Selection", paper SPE 12355, 1985
11. Farrelly, M. and Rabia, H.: "Bit *performance* and Selection: a Novel Approach", paper SPE 16163, IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, 1987.

12. Warren, T.M.: "Factor affecting Torque for a Tricone Bits". J. Petr. Tech., Sept. 1984, pp. 1500-15-8.
13. Pessiw, R.G. and Fear M.J: "Quantifying Common Drilling Problems With Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction, paper SPE 24584, ATCE SPE Washington DC, 1992.
14. Curry, D., Fear, M, Govzitch, A. and Agazada, L.: "Technical Limit Specific Energy, an Index to Facilitate Drilling *performance* Evaluation", paper SPE 92318, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 2005.
15. Waughman, R. J., Kenner, J. V., Moore, R. A.: "Hughes Real-Time Specific Energy Monitoring Reveals Drilling Inefficiency and Enhances the Understanding of When to Pull Worn PDC Bits", SPE paper 74520 presented at the IADC/SPE Drilling Conference, 26-28 February 2002, Dallas, Texas.
16. Perrin, V.P. et al.: "Drilling Index - A new Approach to Bit *performance* Evaluation", paper SPE 37595, SPE/IADC Drilling Conference, 1997.
17. O'Hare, J. and Aigbekaen O.O.A., Jr: "Design Index: a systematic method of PDC drill bit selection", paper SPE 59112, IADC/SPE Drilling Conference, 2000.
18. Bilgesu, H.I., Rachidi, A.F., Aminian, K., and Ameri, S.: "An unconventional Approach for drill bit selection", paper SPE 68089, SPE Middle East Oil Show, 2001.
19. D'Amico & Deidda: "Metodo per una scelta ottimizzata degli scalpelli e dei parametri di perforazione", documento interno Agip, Tepe/Perf. Rel. N. B/025, 1980.
20. Simmons E.L.: "A Technique for Accurate Bit Programming and Drilling *performance* Optimization", paper IADC/SPE 14784, presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, 1986.




21. Dumans, C. F. and Maidla, E.E.: "PDC bit selection method through the analysis of past bit *performances*", paper SPE Paper 21073, Latin American Petroleum Engineering Conference, 1990.
22. Dumans, C. F., Maidla, E.E., Falcao, J.L. and Dezen, J.F.: "PDC bit selection through cost prediction estimates using crossplots and sonic log data", paper SPE 25733, SPE/IADC Drilling Conference, 1993
23. De Castro, F.J.N., Fontoura, S.A.B., Albuquerque, L.C., Frydam. M. and Dumans, C. F.: "Evaluation of Drill Bit *performance* Taking Into Account the In Situ State of Stress", paper SPE 39006, presented at the L.A.C.P.E.C., Rio de Janeiro, 1997.
24. Fear, M.J., Meany, N.C. and Evans, J.M.: "An expert system for drill bit selection", paper SPE 27470, IADC/SPE Drilling Conference, 1994
25. Bjornsson, E., Hucik, B., Szutiak, G., Brown, L.A., Evans, H. Jr., Curry, D., Perry, P.:" Drilling Optimization Using Bit Selection Expert System and ROP Prediction Algorithm Improves Drilling *performance* and Enhances Operational Decision Making by Reducing *performance* Uncertainties", SPE paper 90752 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 26-29 September 2004, Houston, Texas.
26. Clegg, J. and Barton, S.: "Improved Optimization of Bit Selection Using Mathematically Modelled Bit *performance* Indices", paper IADC/SPE 102287 presented at the A.P.D.T.C.E., Thailand, 2006
27. R. Deidda, Corso per Drilling Engineer di Eni S.p.A. Div. E&P, modulo "Scalpelli", internal report, 2002.
28. Bourgoyne, A.T. jr, Millchem, K.K., Chenevert M. E., Young F.S. jr: "Applied Drilling Engineering", SPE Text Book 2, Richardson, 1986.
29. Maurer, W.C.: "The Perfect Cleaning Theory of Rotary Drilling", Trans. AIME, 225, 1962.

30. Bingham, M.G.: "A New Approach to interpreting Rock Drillability", reprinted from Oil & Gas J. series by Petroleum Pub. Co., 1965.
31. Young, F.S. Jr.: "Computerized Drilling Control", Trans. AIME, 246, 1969.
32. Galle, E.M. and Woods, A.B.: "Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits", Drill. and Prod. Prat., API, 1963.
33. Rabia, H.: "Oilwell Drilling Engineering: principles and practice", ISBN 0-86010-714-0 Pbk, 1985.
34. Caicedo, H.U., Calhoun, W.M. and Ewy, R.T.: "Unique ROP Predictor Using Bit-specific Coefficient of Sliding Friction and Mechanical Efficiency as a Function of Confined Compressive Strength Impacts Drilling *performance*", paper SPE/IADC 92576 presented at 2005 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Feb. 23-25.
35. Macini, P., Magagni, M., Valente, P.: "Drill-Bit Catalog and Bit Index: a New Method for Bit *performance* Evaluation", paper SPE 94798, Latin American Petroleum Engineering Conference, 2005.
36. Magagni, M., "More Value to Bit *performance* with Bit Index and Minimum Interval Concept", SPE European Student Paper Contest 2006, Amsterdam, 11th April 2006. Finalist paper.
37. Macini, P., Magagni, M., Valente, P.: "Ottimizzazione della perforazione: metodi innovativi per la valutazione dell'economicità degli scalpelli". Acque sotterranee, fascicolo 102 – Agosto 2006, pagg. 25-34.
38. Macini, P., Magagni, M., Valente, P.: "Bit *performance* Evaluation in Southern Italy". Atti di MPES 2006, Fifteenth International on mine planning and equipment selection, Torino, 20-22 Settembre 2006, ISBN 88-901342-4-0, pagg. 1261 – 1266.
39. Macini, P., Magagni, M., Valente, P.: "Recent Evolution of Drill Bits for Hard and Abrasive Formations. Atti di MPES 2006, Fifteenth International on mine

- planning and equipment selection, Torino, 20-22 Settembre 2006, ISBN 88-901342-4-0, pagg. 1255 – 1260.
40. Macini, P., Magagni, M., Valente, P, Da Dalt, G: “How Minimum Interval Concept Can Improve Bit *performance* Evaluation”, paper IADC/SPE 103590, presented at the 2006 IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference (APDT) 13-15 november 2006, Bangkok, Thailand.
  41. Macini, P., Magagni, M., Valente, P, Da Dalt, G: “Bit *performance* Evaluation by Means of Bit Index and Formation Drillability Catalogue”, presented at the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, March 28-30, 2007, Ravenna, Italy.
  42. Macini, P., Magagni, M., Valente, P, Da Dalt, G: “Bit *performance* Evaluation revisited by Means of Bit Index and Formation Drillability Catalogue”, paper SPE/IADC 107536 che sarà presentato allo SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition held in Cairo, Egypt, 22–24 October 2007.
  43. Da Dalt, G.: “Basic Table for the Geotechnical Clustering of the Formations”, Eni E&P Div., Internal Report, 2002.
  44. Elmi, C., Diretto, M.: “Geologia”, lezioni per il corso di laurea in Ingegneria per l’Ambiente ed il Territorio, Pitagora Editrice Bologna, 1996.
  45. K. Thuro, G. Spaun, “Drillability in hard rock drill and blast tunnelling”, Geomechanics, February 1996.
  46. Attività geologica di cantiere nella ricerca di idrocarburi, Agip S.p.A., 1980.

**ALLEGATO 1: PROCEDURA PER LA COMPILAZIONE DELLE  
INFORMAZIONI GEOLOGICHE DEL *FORMATION DRILLABILITY*  
CATALOG**

Il presente allegato riporta le parti essenziali (senza appendici) della procedura aggiornata all'anno 2006 per la compilazione della tabella base per il clustering geotecnico delle formazioni.

|   |   |      |                            |           |                     |
|---|---|------|----------------------------|-----------|---------------------|
|  | ENI S.p.A.<br>Divisione Agip<br>SPEO - GEOP | data | Doc. N.<br>1.4.15.58 - 1.1 | Rev.<br>0 | Fogli di<br>18<br>1 |
|---|---|------|----------------------------|-----------|---------------------|

SPECIFICHE TECNICHE

**COMPILAZIONE TABELLA BASE PER IL "CLUSTERING" GEOTECNICO DELLE FORMAZIONI**

**INDICE**

|             |                    |                  |                   |                  |             |
|-------------|--------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------|
|             |                    |                  |                   |                  |             |
| 1           | Revisione          | G. Da Dalf       | G. Da Dalf        | G. Ragosa        | 18-09-06    |
| 0           | Revisione          | G. Da Dalf       | G. Da Dalf        | G. Ragosa        | 22-11-02    |
| <b>REV.</b> | <b>DESCRIZIONE</b> | <b>PREPARATO</b> | <b>VERIFICATO</b> | <b>APPROVATO</b> | <b>DATA</b> |

## ALLEGATO 2: PARAMETRI CLASSIFICATI NEL DATABASE FDC

Il presente allegato riporta le diciture dei parametri contenute nel *database* FDC.

Dalla cella 1 alla cella 114 costituisce anche il *template* per il caricamento dei dati nel *database* FDC.

Per ognuna delle dieci tabelle che vi sono riportate, la prima riga rappresenta il numero progressivo della cella, la seconda il nome utilizzato nel *database Oracle* per l'identificazione del parametro, la terza riga il nome che si trova sui documenti di base da cui trarre il dato.

Le presenti tabelle sono contenute in un foglio di calcolo, ne costituiscono le etichette delle colonne e la versione elettronica è contenuta nell'allegato 4 della presente relazione (raccolta dei dati in formato elettronico).

| 1           | 2         | 3                            | 4                                       | 5   | 6   | 7        | 8           | 9         | 10  | 11                | 12  | 13                | 14  |
|-------------|-----------|------------------------------|---|---|---|----------|-------------|-----------|---|-------------------|---|-------------------|---|
| well code   | MI number | well name (da CDB - well_id) | end of drilling date (da CDB - well_id) | formation (link con CDB tramite liths_ntvl_cd a liths_ntvl_cd_tb) | unit / member (link con CDB tramite liths_ntvl_cd a liths_ntvl_cd_tb) | top (md) | bottom (md) | thickness | codice litotipo 1 (link con CDB tramite lithl_ntvl_cd a lithl_ntvl_cd_tb) | % litotipo 1      | codice litotipo 2 (link con CDB tramite lithl_ntvl_cd a lithl_ntvl_cd_tb) | % litotipo 2      | codice litotipo 3 (link con CDB tramite lithl_ntvl_cd a lithl_ntvl_cd_tb) |
| WELL_ID_NBR | MI_NBR    |                              |   | LITHS_NTVL_CD   |   | TOP_MD   | BOTTOM_MD   | THICKNESS | LITHL_NTVL_CD_1   | LITHL_NTVL_PERC_1 | LITHL_NTVL_CD_2   | LITHL_NTVL_PERC_2 | LITHL_NTVL_CD_3   |

|    |                         |                                       |
|----|-------------------------|---------------------------------------|
| 15 | LITHL_NTVL_PERC_3       | % litotipo 3                          |
| 16 | DIP_AVG                 | dip average                           |
| 17 | DIP_AZIMUT_AVG          | dip azimuth average                   |
| 18 | FRACTURE_DEGREE         | fracturation degree (*)               |
| 19 | STRUCT_FEATURE          | structural feature (**)               |
| 20 | DELTA_T_AVG             | average $\Delta t$                    |
| 21 | FIT_MEAS                | FIT meas (specific gravity)           |
| 22 | LOT_MEAS                | LOT meas (specific gravity)           |
| 23 | HOLE_INCL_AT_TOP        | hole inclination at top               |
| 24 | AZIMUT_HOLE_INCL_TOP    | Azimuth of hole inclination at top    |
| 25 | HOLE_INCL_AT_BOTTOM     | hole inclination at bottom            |
| 26 | AZIMUT_HOLE_INCL_AT_BOT | azimuth of hole inclination at bottom |
| 27 | BIT_DIAM                | bit diameter                          |
| 28 | DRILLING_TCHNQ          | drilling technique (***)              |
| 29 | BIT_MANUFACTURER        | bit manufacturer                      |

|    |                    |   |
|----|--------------------|---|
| 30 | BIT_NM             | bit name  |
| 31 | IADC_CD            | IADC code   |
| 32 | ROLLER_FIXED_BIT   | Roller o Fixed Bit  |
| 33 | NEW_RR_BIT         | new or RR bit   |
| 34 | DEPTH_BIT_TRIP_OUT | depth of bit trip out   |
| 35 | BIT_FOOTAGE        | Bit footage   |
| 36 | ROP_AVG            | R.O. P. average (m/h)   |
| 37 | MUD_TYPE           | mud type (link con CDB tramite DRLG_MUD_CD a DRLG_MUD_CD_TB)                    |
| 38 | MUD_WGHT_AT_TOP    | mud weight at top (g/l)   |
| 39 | MUD_WGHT_AT_BOTTOM | mud weight at bottom (g/l)  |
| 40 | PRBL_TYP_CD        | technical problem (++) (link con CDB tramite PRBL_TYP_CD a WELL_PRBL_TYP_CD_TB) |
| 41 | TECH_PROBL_DESCR   | technical problems (++)   |
| 42 |                    | Remarks   |
| 43 |                    | lithologic description (vale solo per il foglio Excel - macro di Laura)         |

|    |                |                    |
|----|----------------|--------------------|
| 44 | DTVD_TOP_MI    | DTVD Top MI (m)    |
| 45 | DTVD_BOTTOM_MI | DTVD Bottom MI (m) |
| 46 | ETIM           | ETIM (ht:mm:ss)    |
| 47 | GAST           | GAST (ppm)         |
| 48 | C1             | C1 (ppm)           |
| 49 | C2             | C2 (ppm)           |
| 50 | C3             | C3 (ppm)           |
| 51 | IC4            | IC4 (ppm)          |
| 52 | NC4            | NC4 (ppm)          |
| 53 | IC5            | IC5 (ppm)          |
| 54 | NC5            | NC5 (ppm)          |
| 55 | FLIN           | FLIN (l/min)       |
| 56 | FLOU           | FLOU (l/min)       |
| 57 | FLOW           | FLOW (L/min)       |
| 58 | WOB            | WOB (metric tonne) |

|    |                   |                   |
|----|-------------------|-------------------|
| 59 | M_LS (l/min)      | M_LS              |
| 60 | M_LT (l/min)      | M_LT              |
| 61 | SPP (kg/cm2)      | SPP               |
| 62 | TORQ (Kgm)        | TORQ              |
| 63 | RPM (rpm)         | RPM               |
| 64 | TRPM (rpm)        | TRPM              |
| 65 | T_IN (°C)         | T_IN              |
| 66 | T_OUT (°C)        | T_OUT             |
| 67 | Q2PC (%)          | Q2PC              |
| 68 | Q2AP (API)        | Q2AP              |
| 69 | QFT1 (tu)         | QFT1              |
| 70 | Bit Number        | BIT_NBR           |
| 71 | Bit Serial Number | BIT_SERIAL_NUMBER |
| 72 | Nozzle1 (1/32")   | NOZZLE_1          |
| 73 | Nozzle2 (1/32")   | NOZZLE_2          |

|    |                        |           |
|----|------------------------|-----------|
| 74 | Nozzle3 (1/32")        | NOZZLE_3  |
| 75 | Nozzle4 (1/32")        | NOZZLE_4  |
| 76 | Nozzle5 (1/32")        | NOZZLE_5  |
| 77 | Nozzle6 (1/32")        | NOZZLE_6  |
| 78 | Nozzle7 (1/32")        | NOZZLE_7  |
| 79 | Nozzle8 (1/32")        | NOZZLE_8  |
| 80 | Nozzle9 (1/32")        | NOZZLE_9  |
| 81 | Nozzle10 (1/32")       | NOZZLE_10 |
| 82 | TFA (sqin)             | TFA       |
| 83 | Wear 1 - Inner rows    | WEAR_1    |
| 84 | Wear 2 - Outer rows    | WEAR_2    |
| 85 | Wear 3 - Dull char     | WEAR_3    |
| 86 | Wear 4 - Location      | WEAR_4    |
| 87 | Wear 5 - Bearing/Seals | WEAR_5    |
| 88 | Wear 6 - Gauge 1/16    | WEAR_6    |

|     |  |                      |
|-----|--|----------------------|
| 89  | Wear 7 - Other chars   | WEAR_7               |
| 90  | Wear 8 - Reason POOH   | WEAR_8               |
| 91  | Under Balanced (Y/N)   | UNDER_BALANCED       |
| 92  | BHA Number   | BHA_NBR              |
| 93  | R1 - Geologic Formation (è il campo R1 qui a destra senza il numero finale) - viene utilizzato nella group by dei benchmark) | R1_GEOL_FORMATION    |
| 94  | R1 - geotechnique formation (difficuly degree) (Info inserita da Da Dait sulla base di analisi fatte con i filtri di Laura)  | R1_GEOTECHNIQUE      |
| 95  | Depth In (RKB)   | DEPTH_IN             |
| 96  | Depth Out (RKB)  | DEPTH_OUT            |
| 97  | Description  | DESCRIPTION          |
| 98  | Gauge Outer Diameter (Stabilizer Only)   | GAUGE_OUTER_DIAMETER |
| 99  | Outer Diameter   | OUTER_DIAMETER       |
| 100 | Inside Diameter  | INSIDE_DIAMETER      |
| 101 | Length   | LENGTH               |

|     |                        |   |
|-----|------------------------|---|
| 102 | CUMULATIVE_LENGTH      | Cumulative Length                               |
| 103 | DISTANCE_BIT_FACE_STAB | Distance from Bit Face to Center of Stabilizer  |
| 104 | STABILIZER_TYPE        | Stabilizer Type                                 |
| 105 | WEIGHT                 | Weight  |
| 106 | BENT_SUB               | Bent Sub or Housing Angle deg                   |
| 107 | BEND_DISTANCE          | Distance from Bend (Sub or Housing) to Bit Face |
| 108 | BHA_COMPONENT          | BHA Component                                   |
| 109 | DRILL_PIPE_GRADE       | Drill Pipe Grade                                |
| 110 | DRILL_PIPE_THREAD      | Drill Pipe Thread                               |
| 111 | BHA_COMMENTS           | BHA Comments                                    |
| 112 |                        | Pozzo a terra / a mare (viene da CDB - WELL_ID) |
| 113 | BIT_COST               | Bit Cost (€)                                    |
| 114 | FACILITY_COST          | Costo Impianto/ora (€/h)                        |
| 115 | B_WOB                  | WOB Benchmark                                   |

|     |               |                                   |
|-----|---------------|-----------------------------------|
| 116 | B_TRPM        | TRPM Benchmark                    |
| 117 | B_BHHP        | BHHP Benchmark                    |
| 118 | B_ROP         | ROP Benchmark                     |
| 119 | B_BIT_FOOTAGE | H Benchmark                       |
| 120 | B_TORQ        | TQ Benchmark                      |
| 121 | B_DG          | DG Benchmark                      |
| 122 |               | Crop                              |
| 123 |               | Cfootage                          |
| 124 |               | Ctorq                             |
| 125 |               | Cdg                               |
| 126 |               | BI MI                             |
| 127 |               | SEI MI (MJ/m <sup>3</sup> )       |
| 128 |               | CM MI (€/m)                       |
| 129 |               | EI MI (€)                         |
| 130 |               | SEI meccanico [N/m <sup>2</sup> ] |

|     |  |  |
|-----|--|--|
| 131 |  | $\sigma$ idraulico [N/m <sup>2</sup> ] |
| 132 |  | BI run                                 |
| 133 |  | EI run                                 |
| 134 |  | SE run                                 |
| 135 |  | CM run                                 |
| 136 |  | R2-difficulty degree                   |
| 137 |  | NOTE                                   |



**ALLEGATO 3: ELENCO DELLE PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE  
PRODOTTE DURANTE IL PROGETTO *BIT PERFORMANCE***

**Congressi**

1. Macini, P., Magagni, M., Valente, P.: "Drill-Bit Catalog and Bit Index: a New Method for Bit Performance Evaluation", Paper SPE 94798, L.A.C.P.E.C., Rio de Janeiro, 20 - 23 Giugno 2005.
  
2. Macini, P., Magagni, M., Valente, P.: "Bit Performance Evaluation in Southern Italy". Atti di MPES 2006, Fifteenth International on mine planning and equipment selection, Torino, 20-22 Settembre 2006, ISBN 88-901342-4-0, pagg. 1261 – 1266.
  
3. Macini, P., Magagni, M., Valente, P.: "Recent Evolution of Drill Bits for Hard and Abrasive Formations. Atti di MPES 2006, Fifteenth International on mine planning and equipment selection, Torino, 20-22 Settembre 2006, ISBN 88-901342-4-0, pagg. 1255 – 1260.
  
4. Macini, P., Magagni, M., Valente, P., Da Dalt, G: "How Minimum Interval Concept Can Improve Bit Performance Evaluation", paper IADC/SPE 103590, presented at the 2006 IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference (APDT) 13-15 november 2006, Bangkok, Thailand.
  
5. Macini, P., Magagni, M., Valente, P., Da Dalt, G: "Bit Performance Evaluation by Means of Bit Index and Formation Drillability Catalogue", presented at the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, March 28-30, 2007, Ravenna, Italy.

6. Macini, P., Magagni, M., Valente, P., Da Dalt, G: “Bit Performance Evaluation revisited by Means of Bit Index and Formation Drillability Catalogue”, paper SPE/IADC 107536 presented at the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition held in Cairo, Egypt, 22–24 October 2007.

### **Riviste**

- a) Macini, P., Magagni, M., Valente, P.: “Ottimizzazione della perforazione: metodi innovativi per la valutazione dell’economicità degli scalpelli”. Acque sotterranee, fascicolo 102 – Agosto 2006, pagg. 25-34.
- b) Macini, P., Magagni, M., Valente, P, “Bit Performance Evaluation through Bit Index and Minimum Interval Concept”, Bulletin of SPE Italian Section, n.2/06,
- c) Macini, P., Magagni, M., Valente, P, Da Dalt, G: “Bit Performance Evaluation by Means of Bit Index and Formation Drillability Catalogue”, Bulletin of SPE Italian Section, n.1/07.

### **Premi**

- II. SPE European Student Paper Contest 2006, Amsterdam, 11th April 2006. Finalist paper: Magagni, M., “More Value to Bit Performance with Bit Index and Minimum Interval Concept”.