

Indice

1	Introduzione	6
2	Principi e tecniche di perforazione	13
2.1	Funzione abbattimento	13
2.1.1	Meccanismi e criteri di rottura in terreni e rocce	13
2.1.2	Analisi energetica della funzione di abbattimento	17
2.2	Funzione allontanamento dei detriti.....	21
2.2.1	Sollevamento meccanico.....	21
2.2.2	Sollevamento idraulico	26
2.3	Funzione sostegno delle pareti	29
2.3.1	Stato di sollecitazione naturale.....	29
2.3.2	Stato di sollecitazione indotto dallo scavo.....	30
2.3.3	Tipologia dei rivestimenti	34
2.3.4	La formazione del pannello di fango.....	38
2.4	Le tecniche di perforazione	42
3	Impieghi dell'energia nella perforazione.....	44
3.1	Generale.....	44
3.2	Funzione sollevamento.....	46
3.2.1	Potenza motrice teorica	46
3.2.2	Influenza della potenza installata sui tempi di sollevamento.....	51
3.2.3	Regola pratica	52
3.3	Funzione rotazione	52
3.3.1	Potenza motrice teorica	52
3.3.2	Regola pratica	53
3.3.3	Considerazioni generali.....	53
3.4	Funzione circolazione	53
3.4.1	Descrizione del circuito del fluido di circolazione	53

3.4.2	Potenza per la funzione circolazione.....	55
3.4.3	Regola pratica	55
3.4.4	Potenza teorica richiesta dalla funzione circolazione	55
4	La perforazione a roto-percussione.....	59
4.1	Introduzione	59
4.2	Fondamentali della perforazione a roto-percussione.....	60
4.2.1	Percussione.....	61
4.2.2	Rotazione	62
4.2.3	Carico di spinta	63
4.2.4	Rimozione dei detriti.....	64
4.3	Perforazione con Martello in Superficie	65
4.3.1	Impianto di perforazione pneumatico	66
4.3.2	Impianto di perforazione idraulico.....	67
4.4	Perforazione con Martello a Fondo Foro.....	69
4.5	Analisi di un sistema di perforazione con martelli fondo foro.....	74
4.5.1	Il martello fondo foro	74
4.5.2	Analisi energetica dell'azione utensile-terreno	77
4.5.3	Analisi del processo di abbattimento e riduzione dei detriti	78
4.5.4	Il moto dei detriti nell'intercapedine aste-foro	80
4.5.5	Analisi del flusso attraverso il condotto di scarico.....	81
4.5.6	Analisi della funzione di circolazione applicata a martelli fondo foro commerciali.....	84
5	La perforazione a rotazione.....	87
5.1	Cantiere di Perforazione.....	88
5.2	Impianto di Perforazione a terra	88
5.3	Impianto di Perforazione a mare	89
5.4	Impianto di Perforazione.....	90
5.4.1	Gruppo motore	90
5.4.2	Trasmissione meccanica	91

5.4.3	Trasmissione elettrica	91
5.5	Impianto di sollevamento.....	91
5.5.1	L'argano.....	91
5.5.2	La torre.....	92
5.5.3	Il cavo	92
5.5.4	Le taglie ed il gancio.....	93
5.6	Gli organi rotanti.....	94
5.6.1	La tavola rotary	94
5.6.2	La testa di iniezione	94
5.6.3	Asta motrice e batteria di aste.....	94
5.6.4	Gli scalpelli	96
5.7	Il circuito del fango.....	96
5.7.1	Le pompe	97
5.7.2	Condotte di superficie - Manifold - Vasche.....	98
5.7.3	Vibrotaglio	98
5.7.4	Altre apparecchiature.....	99
5.8	Fanghi di perforazione	99
5.9	Organi di sicurezza.....	100
5.10	La testa pozzo	102
5.10.1	La testa pozzo per impianti a terra	103
5.10.2	La testa pozzo sottomarina	103
5.10.3	La base guida temporanea	104
5.10.4	La base guida permanente	104
5.10.5	Sistemi di inizio pozzo	105
5.11	La manovra di estrazione.....	107
5.12	La manovra di discesa.....	107
5.13	La cementazione	109
5.14	I cementi di perforazione.....	110

5.15	La squadra di perforazione.....	111
6	Utensili di perforazione.....	112
6.1	Tipologie di scalpelli	112
6.1.1	“Rolling Cutter Bits”	112
6.1.2	“Fixed Cutter Bits”.....	121
6.2	Selezione degli scalpelli.....	126
6.3	Meccanismi di rottura della roccia.....	127
6.3.1	Scalpelli a rulli.....	127
6.3.2	Scalpelli a diamanti naturali	128
6.3.3	Scalpelli PDC	128
6.4	Valutazione dell’usura e fattori che la influenzano	128
6.4.1	Consumo dei taglienti.....	129
6.4.2	Consumo dei cuscinetti.....	131
6.4.3	Consumo del diametro	132
6.5	Fattori che incidono sulla velocità di perforazione	132
6.5.1	Tipo di scalpello.....	133
6.5.2	Caratteristiche della formazione.....	133
6.5.3	Proprietà del fluido di perforazione	135
6.5.4	Parametri di perforazione	136
6.5.5	Usura dei taglienti.....	137
6.5.6	Idraulica dello scalpello.....	137
6.6	Modelli predittivi della velocità di avanzamento.....	142
6.6.1	Esperienze precedenti.....	148
6.6.2	Un’ulteriore teoria per la previsione della velocità di <i>avanzamento: le reti neurali</i> 151	
7	Carotieri e campionatori meccanici	152
7.1	Scopi principali del prelievo di campioni.....	152
7.2	Principali tipi di carotieri meccanici di fondo	153
7.2.1	Carotiere semplice	153

7.2.2	Carotiere combinato	168
7.2.3	Carotiere doppio.....	171
7.2.4	Carotiere wire-line.....	172
8	Fluidi di perforazione	175
8.1	Funzioni di un fluido di perforazione	175
8.1.1	Pulizia del foro	175
8.1.2	Controllo delle pressioni di formazione	180
8.1.3	Stabilizzazione del foro.....	181
8.1.4	Supportare il peso del casing e della batteria di perforazione	181
8.1.5	Pulizia , raffreddamento e lubrificazione della batteria di perforazione.	182
8.1.6	Trasmissione della potenza idraulica allo scalpello.....	183
8.1.7	Limitare la corrosione delle parti tubolari metalliche.....	184
8.1.8	Fornire informazioni sul terreno attraversato.....	184
8.1.9	Salvaguardia dell'ambiente e della formazione produttiva.....	185
8.2	Classificazione dei fluidi di perforazione.....	185
8.3	Proprietà dei fluidi di perforazione.....	186
8.3.1	Peso specifico o densità.....	186
8.3.2	<i>Filtrato</i>	187
8.3.3	Viscosità	188
8.3.4	Viscosità plastica	189
8.3.5	Viscosità apparente	190
8.3.6	Tixometria.....	190
8.3.7	Alcalinità.....	191
8.3.8	Forza di Gel.....	191
8.3.9	Valore di Yield o "Yield Point"	192

1 Introduzione

La realizzazione di fori sia su materiali lapidei che su terreni è sempre stata un'opera necessaria per l'uomo sia al fine di "costruire" che di "produrre".

Infatti basti pensare alla costruzione di capanne ove si rende necessaria la messa in opera di pali di sostegno per infissione nel terreno. Caso analogo sono le fortificazioni militari realizzate con palizzate. La capacità di infissione nel terreno dipende dalla resistenza meccanica del terreno e del legno che viene usato. Ma è anche vero che la lunghezza di infissione, parametro che definisce la resistenza dell'opera, dipende anche dall'attrito tra legno e terreno. Per avere quindi lunghezze di infissione importanti si deve procedere alla realizzazione di un foro e poi battere il palo al suo interno. Altro esempio che utilizzeremo successivamente è l'estrazione della materia prima per la costruzione di templi o grandi edifici. In questo caso è l'operazione di taglio dei blocchi che viene realizzata proprio ricorrendo all'uso di una serie di fori allineati e di cunei¹.

Nel concetto di produzione lo scavo di fori è legato nell'antichità ai pozzi per l'estrazione dell'acqua. Queste opere venivano realizzate a mano ricorrendo come per i cosiddetti pozzi romani ad uno scavo di dimensioni grandi (diametro di 1-2 metri) per consentire all'uomo di penetrare lui stesso nel terreno per effettuare lo scavo. In altri casi dove la resistenza meccanica del terreno non consentiva di realizzare grandi fori si ricorreva e particolari tecniche. Risultano così documentate le tecniche di perforazione adottate dai cinesi (fig. 1)

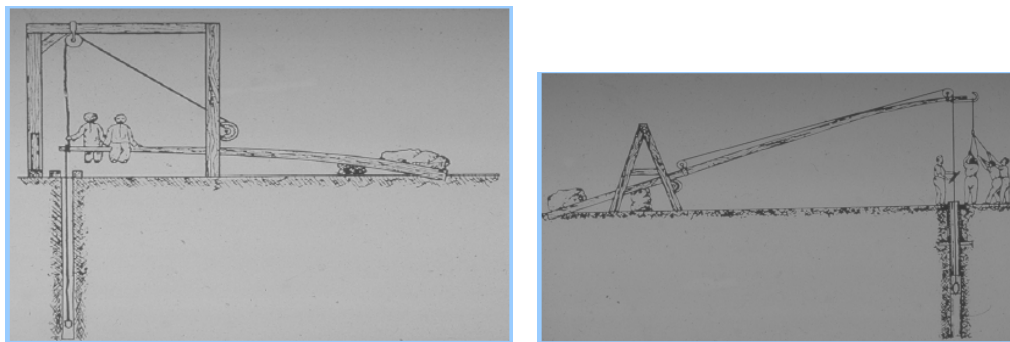


Figura 1 - Disegni cinesi (Fonte: ??)

¹ Aggiungi nota esplicativa

Semplici meccanismi di perforazione che altro non erano che la riproduzione a scala maggiore dei movimenti necessari alla realizzazione di fori di minore importanza.

In tutti questi casi si possono trovare dei punti comuni che caratterizzano ciò che oggi chiamiamo perforazione: l'esistenza di un obiettivo, l'influenza della conduzione delle operazioni e l'interazione uomo-terreno.

Ogni operazione di perforazione ha uno o più **obiettivi** che sono contenuti nel programma di perforazione stesso. Alcuni obiettivi sovente fissati sono:

- ricostruzione stratigrafica
- raggiungimento di una profondità prefissata
- prelievo di campioni
- provvedere alla produzione di fluidi endogeni.

Ciò che consente il raggiungimento dell'obiettivo è la corretta conduzione della perforazione nonché la scelta del metodo di perforazione più idoneo.

Per comprendere cosa sia **corretto** cominciamo a definire che cosa è un foro. Un foro è uno scavo dove prevale la dimensione longitudinale sulle altre due dimensioni. Tale geometria consente di definire la perforazione come un sistema mono-dimensionale caratterizzato da una sezione ed un profilo di scavo. La sezione è generalmente di tipo circolare. In alcuni casi particolari può essere rettangolare. La direzione di scavo è generalmente verso il basso, a favore della gravità, tendendo principalmente ad una direzione verticale. I fori si caratterizzano pertanto con un *diametro*, compreso in genere tra 20 e 1500 mm, una *lunghezza*, che può raggiungere la profondità di 8000 metri, ed una *direzione di scavo*, da 0° a 90° (0° = verticale).

Quindi il concetto di corretta conduzione consiste nel mantenere i parametri di scavo (diametro, profondità e direzione) all'interno di intervalli di confidenza adeguati per conseguire l'obiettivo dello scavo. Proprio a tal fine, un foro è uno scavo e come tale richiede la creazione di uno spazio sotterraneo togliendo o estraendo il materiale costitutivo del sottosuolo. È qui che ci appare chiaro come in tale definizione emerge la necessità di rimuovere il terreno o il materiale lapideo per creare lo spazio. Tale processo si compone di due fasi, una propriamente legata all'abbattimento, sia esso semplice disgregazione che frantumazione, ed un'altra che è costituita dall'allontanamento del materiale abbattuto (operazione senza la quale lo spazio non si potrebbe comunque creare e lo scavo non potrebbe procedere).

Si evidenzia come il processo primario per realizzare un foro sia **l'abbattimento** del terreno seguito dal suo **allontanamento**. Come possiamo abbattere il terreno? A tale domanda possiamo rispondere con un esempio molto semplice. Immaginiamo un materiale lapideo su cui serve realizzare un foro. Ricorriamo ad una tecnologia molto semplice ed "arcaica": l'uso di un *utensile* ed una *massa battente*. Infatti per produrre l'abbattimento dobbiamo fornire energia al sistema. Ma l'energia deve

essere fornita in maniera tale da consentire la rottura del terreno. Quindi l'energia della massa battente viene trasferita al materiale da abbattere attraverso *l'utensile*. Questo dispositivo costituisce al tempo stesso un sistema di trasmissione e di conversione dell'energia. L'energia trasmessa attraverso di esso viene convertita *opportunamente* per poi essere trasmessa, per contatto, al terreno.

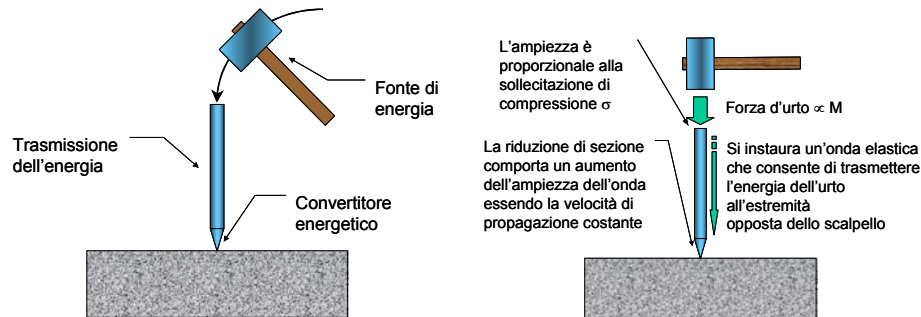


Figura 2 - Trasmissione dell'energia al terreno

La semplice analisi del sistema scalpello-mazza vede una energia prodotta proporzionale alla massa ed alla velocità della mazza al momento della percussione sulla testa dello scalpello. La trasmissione al contatto vede la formazione di una onda elastica di compressione che si propaga attraverso lo scalpello verso il terreno. È questa onda elastica che trasmette l'energia al contatto scalpello-terreno. La riduzione di sezione della punta agisce come un amplificatore di ampiezza della sollecitazione. Ciò consente quindi di trasmettere al terreno energia sottoforma di onda di compressione di ampiezza sufficientemente grande da produrre la rottura nel terreno per superamento della resistenza a compressione. L'analisi energetica deve comunque contemplare le perdite di energia nei punti di giunzione come il contatto mazza-scalpello e scalpello-terreno.

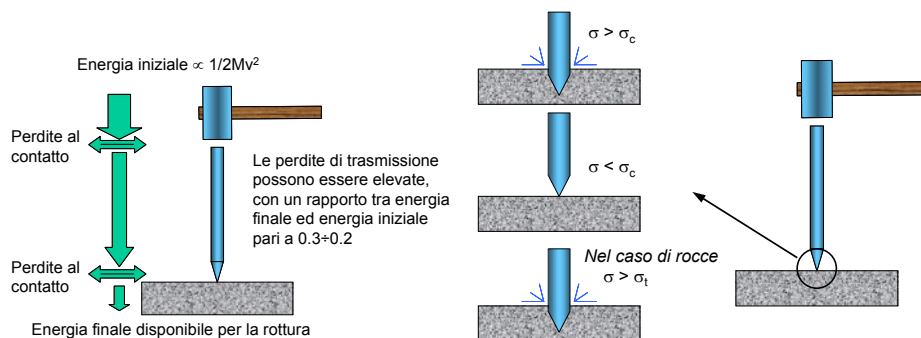


Figura 3 - Trasmissione dell'energia ed abbattimento

La trasmissione dipende dal rapporto di impedenza acustica dei due mezzi. Più le impedenze acustiche sono differenti più basso sarà il rendimento di trasmissione. Si deve inoltre tener conto del tipo di contatto che può fortemente influenzare la trasmissione.

Certi che l'abbattimento avverrà, ci dobbiamo porre la domanda su come rimuovere i detriti dal fondo del foro dove, accumulandosi, tenderanno a

ridurre l'efficienza del processo. Proprio per le caratteristiche geometriche il fondo del foro non è accessibile in generale all'uomo e pertanto si deve operare remotamente. Tali operazioni possono essere eseguite, ad esempio, soffiando o utilizzando un utensile adeguato al prelievo dei detriti.

Altro effetto collaterale nell'avanzamento è la **convergenza delle pareti**. Si intende con questo termine il processo che si instaura al contorno del foro a causa del rilascio tensionale indotto dalla rimozione del materiale. Ciò produce una tendenza delle pareti a chiudersi sul foro producendo franamenti e crolli. Si deve quindi pensare di ovviare a questo fenomeno ricorrendo a dei sistemi di rivestimento provvisori o definitivi per raggiungere l'obiettivo prefissato.

Da questa breve premessa emerge una visione funzionale che utilizzeremo nel proseguo per arrivare così a definire i metodi di perforazione attraverso un processo di *problem-solving*. Possiamo definire tre funzioni primarie, funzione **abbattimento**, funzione **allontanamento dei detriti** e funzione **sostegno delle pareti**, che consentono di realizzare un foro nonché una funzione secondaria sempre presente che è la funzione **sollevamento** (fig. 4).

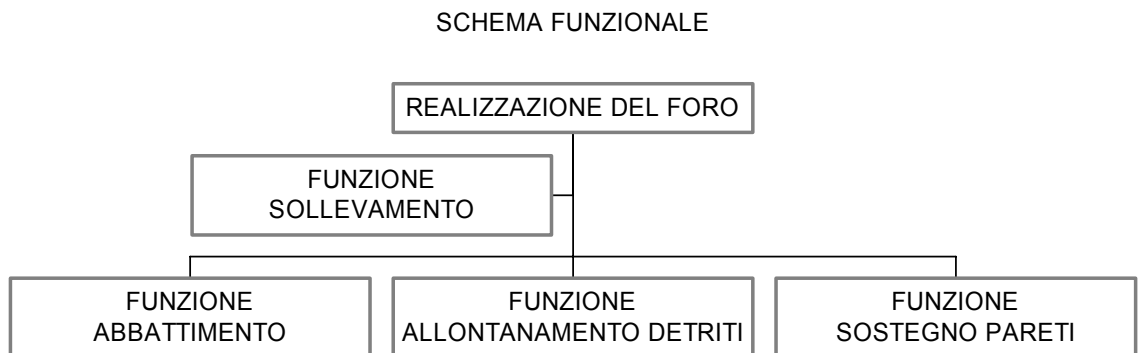
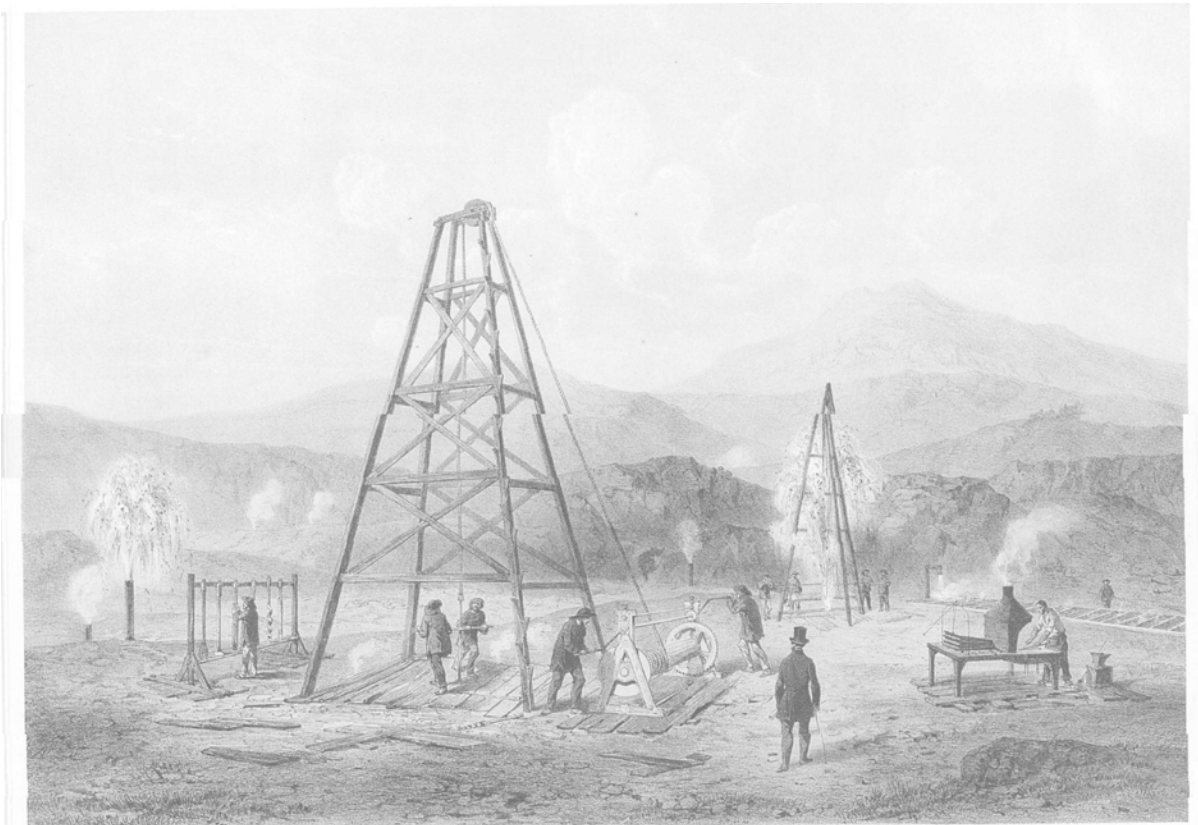
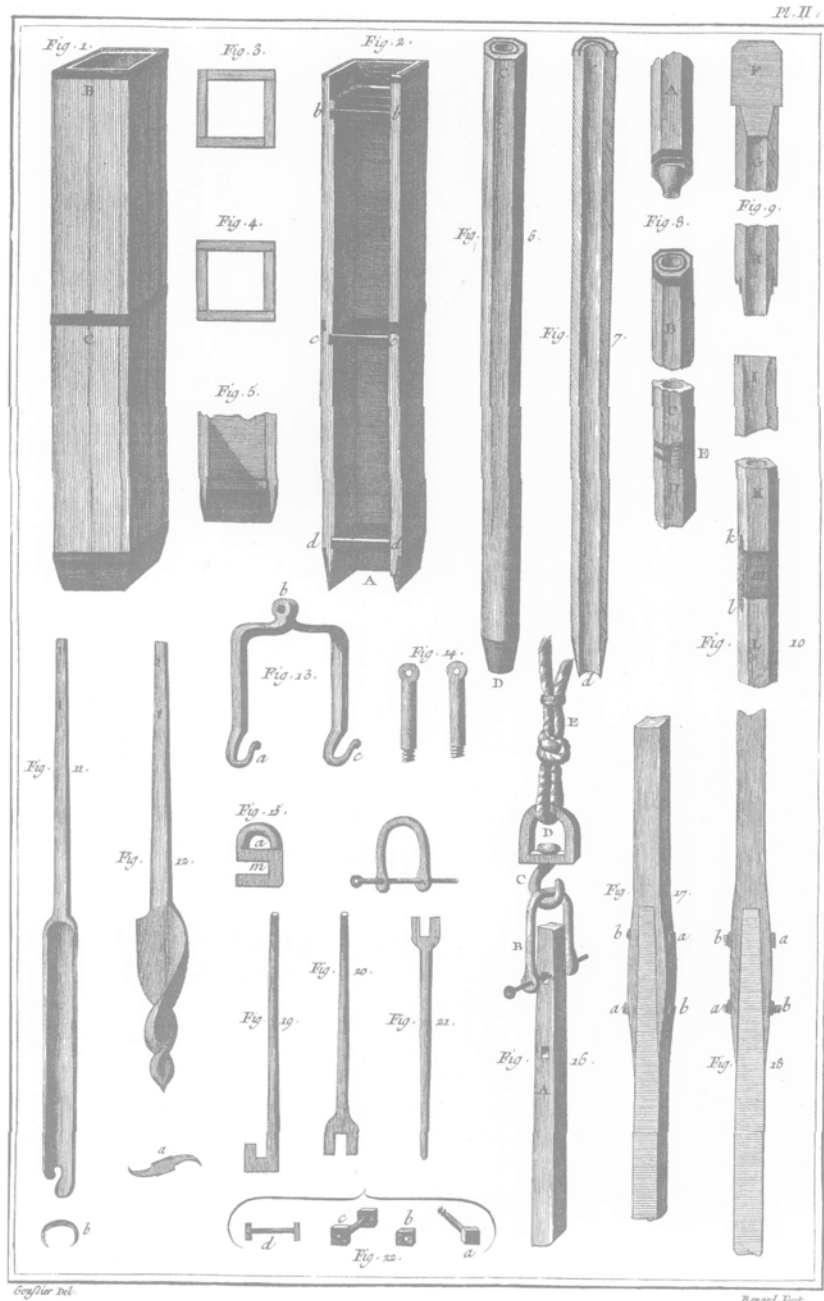
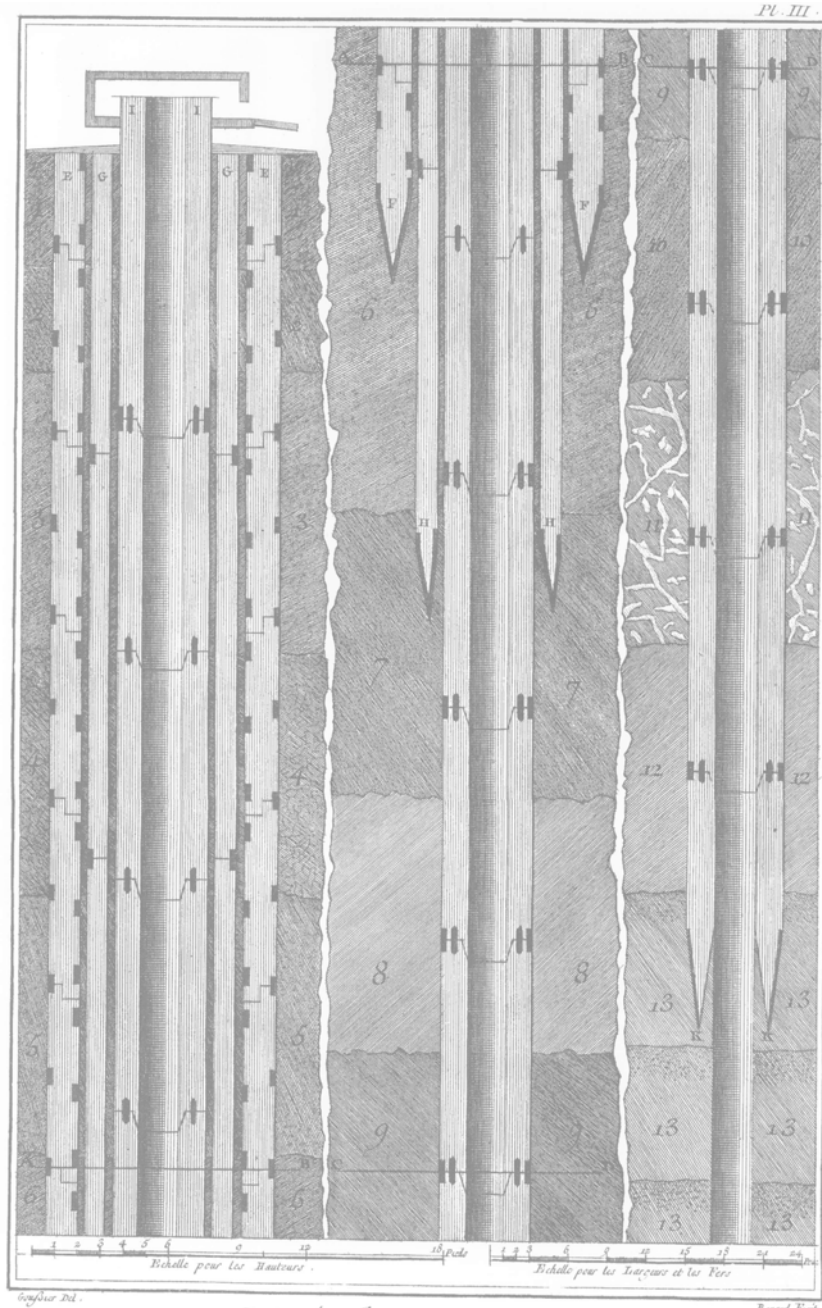


Figura 4 - Schema funzionale della perforazione







Minéralogie, Sonde de Terre

2 Principi e tecniche di perforazione

2.1 Funzione abbattimento

L'abbattimento del materiale nello scavo si ottiene per superamento della propria resistenza meccanica per mezzo della sollecitazione imposta con l'impianto di perforazione. Nel seguito analizzeremo come superare la resistenza meccanica e quali sono i meccanismi di rottura che si attuano.

2.1.1 Meccanismi e criteri di rottura in terreni e rocce

L'approccio di meccanica del continuo che si effettua quando ci si occupa del comportamento meccanico di materiali naturali come rocce o terreni comporta comunque l'assenza dell'ipotesi di omogeneità e di isotropia. Nell'ambito di tali ipotesi la resistenza meccanica si definisce sulla base di un criterio di rottura semplificato.

Il modello più semplice è il **criterio di Mohr**. In tale modello si assume che la rottura dipenda solo dalle sollecitazioni estreme e non quelle intermedie. L'ipotesi è abbastanza valida per materiali a comportamento fragile (rocce); per materiali duttili (terreni) è comunque cautelativa poiché la resistenza in tali casi risulta maggiore.

Se si adotta il criterio di Mohr la resistenza e la superficie limite di rottura dipendono da due soli parametri: le tensioni estremali. Da tale criterio si giunge alla definizione della **curva intrinseca** del materiale come l'involuppo dei cerchi di Mohr per le sollecitazioni limite (Fig. 5).

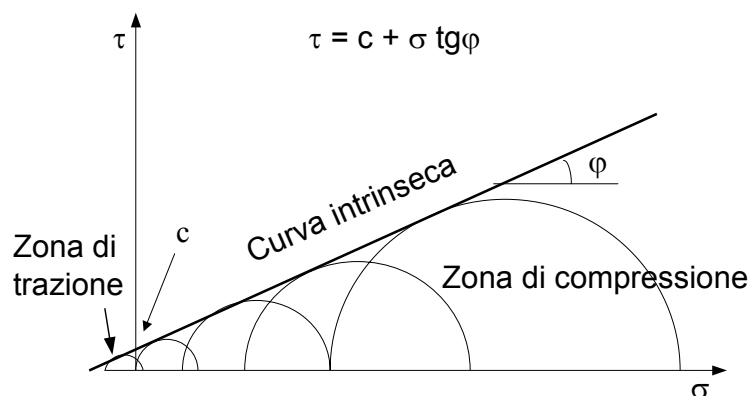


Figura 5 - Curva intrinseca e cerchi di Mohr

La rappresentazione della curva intrinseca si può realizzare sia considerando le tensioni principali (σ_1, σ_3) sia la coppia sforzo normale e sforzo di taglio (σ, τ) che la coppia (p, q). Si può passare da una rappresentazione all'altra senza nessun problema purché sia nota una

delle tre. La rappresentazione più usuale del criterio di Mohr è la seguente,

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi$$

dove

τ è lo sforzo di taglio alla rottura,

σ_n è lo sforzo normale al piano di rottura,

c è la resistenza coesiva o coesione e

φ è l'angolo di attrito interno.

Per comprendere l'uso del criterio di Mohr si consideri un campione di un materiale che si rompe lungo un piano quando viene caricato con una forza di compressione F ed una pressione di confinamento p . le sollecitazioni principali sono lo sforzo di compressione σ_1 dato da,

$$\sigma_1 = \frac{F}{\pi r^2}$$

e lo sforzo di confinamento σ_3 è pari a,

$$\sigma_3 = p$$

Se consideriamo un elemento di materiale su di un piano verticale che taglia il campione, lo stato di sollecitazione è riportato in Fig. 6. L'orientazione del piano di rottura è definita dall'inclinazione θ rispetto ad un piano orizzontale.

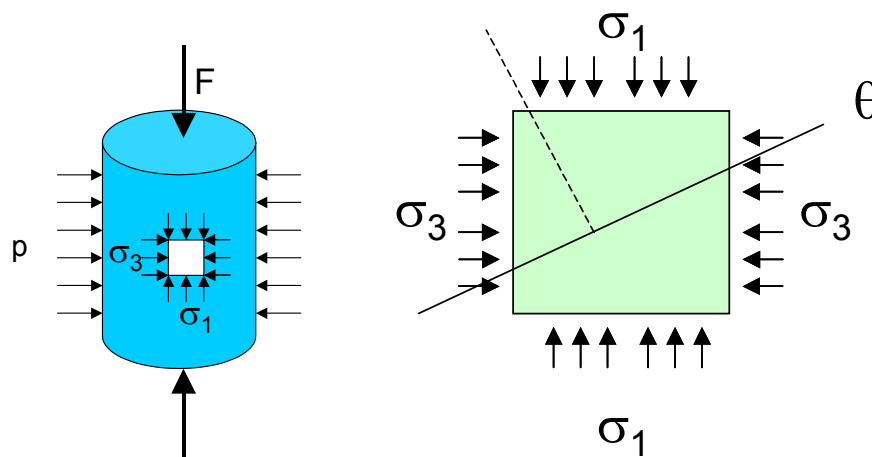


Figura 6 - Sollecitazioni e sforzi interni

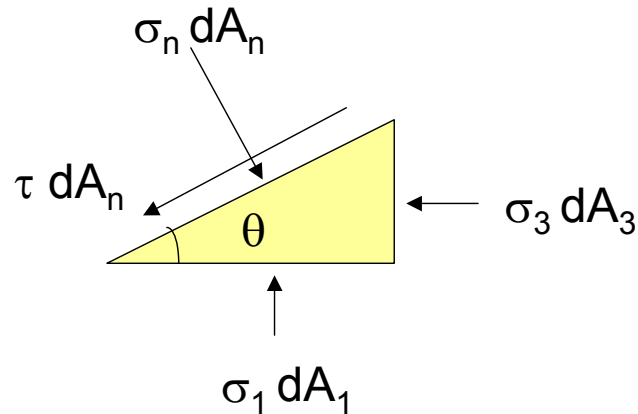


Figura 7 - Scomposizione lungo il piano di rottura

Considerando l'equilibrio delle sollecitazioni normali si può scrivere (Fig.7),

$$\sigma_n dA_n = \sigma_3 dA_3 \cos\theta + \sigma_1 dA_1 \sin\theta$$

$$\sigma_n = \sigma_3 \cos^2\theta + \sigma_1 \sin^2\theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos(2\theta)$$

e per quelle tangenziali,

$$\tau dA_n = \sigma_1 dA_1 \cos\theta - \sigma_3 dA_3 \sin\theta$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)\sin\theta \cos\theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin(2\theta)$$

Le equazioni finali sono rappresentate graficamente dal cerchio di Mohr si rileva inoltre che l'angolo di attrito interno, ϕ , è complementare di 2θ .

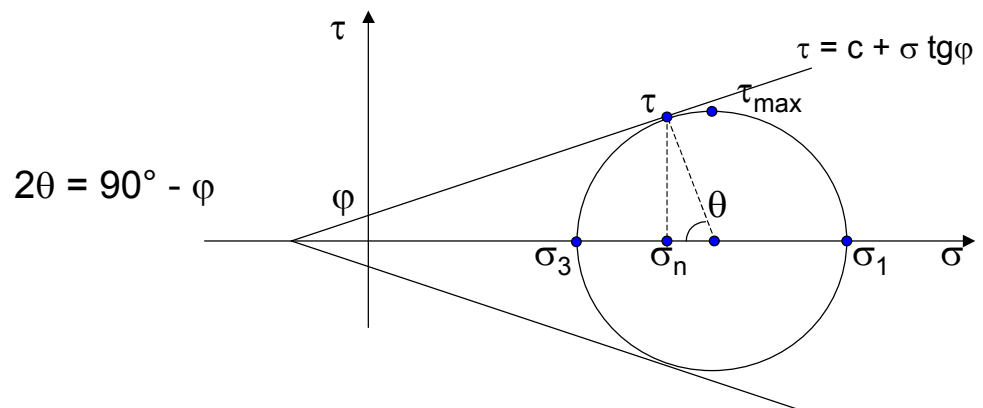


Figura 8 - Il cerchio di Mohr

Il criterio di rottura di Mohr può essere usato per predire l'angolo caratteristico tra il piano di taglio e il piano di spinta di un utensile che

lavora a taglio. Assumendo un angolo di attrito interno di 30° si ha un angolo θ di 30° , verificato sperimentalmente da Gray et al..

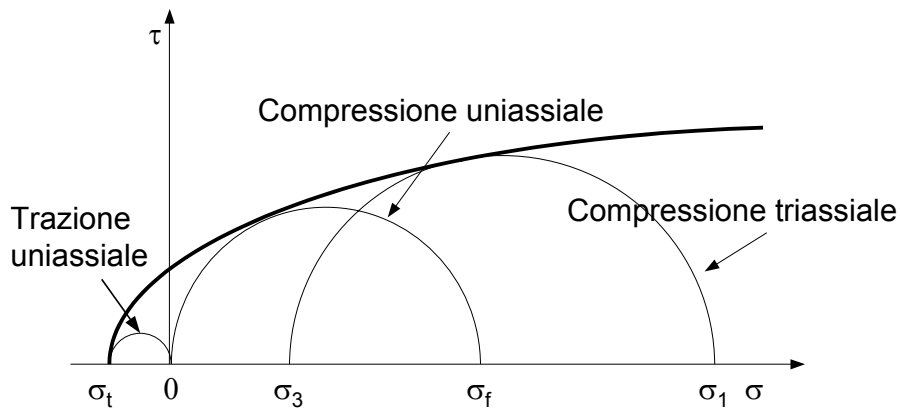


Figura 9 - Stati di sollecitazione semplici

Alcuni stati di sollecitazione semplici sono riportati in Fig.9 ed in particolare: trazione uniassiale (solo per mezzi coesivi), compressione uniassiale (in assenza di confinamento) e compressione triassiale. A questi stati di sollecitazione corrisponderanno dei meccanismi di rottura dei materiali per taglio e/o compressione/trazione. Sono quindi le resistenze al taglio ed alla compressione/trazione che devono essere considerate come riferimento per ottenere la rottura.

Nel caso di materiali lapidei possiamo considerare la condizione di **compressione** uniassiale con deformazione laterale impedita (Fig.10).

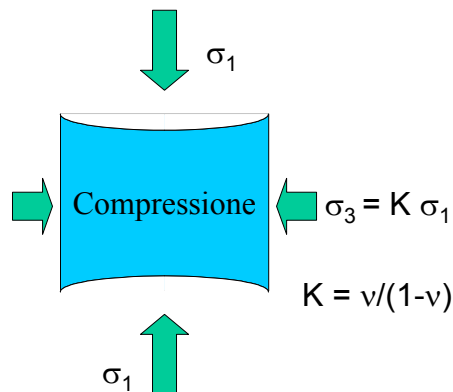


Figura 10 - Compressione uniassiale con deformazione impedita

In questo caso l'impedimento a deformarsi lateralmente si traduce in una sollecitazione di confinamento che è proporzionale alla sollecitazione compressiva. La costante di proporzionalità K può essere, in prima approssimazione, correlata con il coefficiente di Poisson del materiale con

$$K = \frac{\nu}{1-\nu}$$

La condizione di rottura sarà in questo caso espressa dalla seguente relazione,

$$\sigma_1 \geq \frac{2c\sqrt{N\varphi}}{\left[1 - N\varphi \frac{\nu}{1-\nu}\right]}$$

dove $N\varphi = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$ rappresenta l'aumento di resistenza legato alla pressione di contenimento.

L'altra condizione di sollecitazione semplice che può portare a rottura è il **taglio**. In questo caso si considera la presenza di una spinta verticale sul terreno che tende a contrastare il distacco del cuneo (Fig.11).

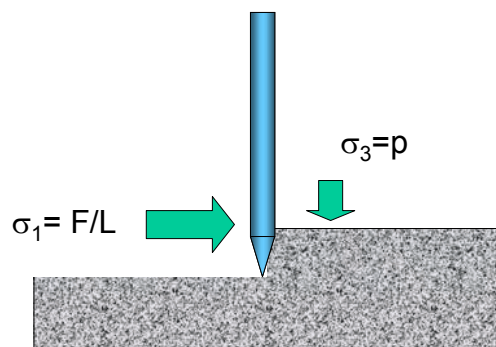


Figura 11 - Sollecitazione di taglio

La condizione di rottura è espressa dalla seguente relazione in termini di tensioni principali,

$$\sigma_1 = 2c \cdot \sqrt{N\varphi} + \sigma_3 \cdot N\varphi$$

avendo considerato l'impiego del criterio di Mohr. Il materiale si rompe seguendo un piano di rottura di inclinazione θ che è costituito da punti per i quali le coppie (σ, τ) sono contenute lungo la curva intrinseca. Si ricorda qui la definizione del coefficiente di spinta passiva che deriva dalla precedente espressione,

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \frac{1}{N\varphi} + \frac{2c\sqrt{N\varphi}}{N\varphi \cdot \sigma_1}$$

2.1.2 Analisi energetica della funzione di abbattimento

L'analisi di tipo energetico è fondamentale per comprendere l'articolazione della funzione abbattimento e l'interrelazione tra le varie funzioni operative che consentono lo scavo del foro.

L'energia trasmessa al terreno dall'utensile (E_t) sarà impiegata in parte per l'abbattimento di nuovo terreno (E_a), e quindi all'avanzamento, e in parte per la ri-frantumazione dei detriti non asportati e presenti al fondo del foro (E_c),

$$E_t = E_a + E_c$$

L'energia che viene adoperata per la rottura del terreno E_a è distinguibile in due componenti:

1. l'energia necessaria al distacco dei frammenti;
2. l'energia necessaria alla frantumazione iniziale.

Il distacco di frammenti richiede una quantità di energia minima sia in termini assoluti sia come percentuale dell'energia in gioco. Prudentemente si deve ammettere che tutto il volume da abbattere sia portato al livello di sollecitazione necessario a provocare la rottura lungo le superfici che lo delimitano². Occorre quindi considerare il trasferimento di una certa quota di energia alla roccia sotto forma di energia potenziale elastica. Tale energia contenuta in un metro cubo di roccia di modulo elastico J ad una sollecitazione σ_{comp} è dato da,

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_{comp}^2}{2J}$$

Il calcolo dell'energia necessaria alla frantumazione iniziale può essere impostato assimilando l'utensile ad un frantumatore ed accettando quindi l'ipotesi di Rittinger³. L'energia può essere così quantificata per unità di volume di roccia,

$$\varepsilon_f = s \cdot \varepsilon_{ss}$$

dove s è la superficie di nuova formazione riferita al volume unitario e ε_{ss} è l'energia superficiale specifica. La teoria di Rittinger consente di conoscere il legame tra la superficie di nuova formazione s e la distribuzione granulometrica ottenuta,

$$s = \frac{k}{D}$$

dove k è una costante di proporzionalità e D è il diametro di riferimento della distribuzione granulometrica, tipicamente il d_{80} , il d_{50} o il diametro massimo.

² Il volume di roccia di cui si considera il distacco può essere un cilindro di base pari alla sezione del foro A_{foro} ed altezza h proporzionale alla velocità di avanzamento.

³ Si ricorda che il modello di Rittinger è differentemente formulato e valido nel caso di micronizzazione ($d < 1\mu m$) mentre il modello di Kick è valido per la frantumazione ($d > 1 mm$)

Si può quindi scrivere che l'energia necessaria all'abbattimento è pari a,

$$E_a = A_{foro} \cdot h \cdot (\varepsilon_p + \varepsilon_f)$$

L'energia necessaria alla frantumazione secondaria E_c dei detriti ottenuti con la prima rottura e non asportati si può calcolare assimilando l'azione dell'utensile ad un frantumatore secondario o ad un mulino. In tal caso si può adottare la legge di Bond per stimare l'energia necessaria a ridurre i detriti alla dimensione necessaria per il loro trasporto. La legge di Bond si esprime con la seguente relazione,

$$E_{Bond} = 100E_i \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right)$$

dove E_i è l'indice di Bond o *Bond work index* e dipende principalmente dal materiale da ridurre e d_{80} e D_{80} sono i diametri caratteristici delle distribuzioni granulometriche rispettivamente dopo e prima della operazione di comminuzione, espressi in micron.

In tale espressione l'energia è espressa in kWh/ton (short), quindi è una energia per unità di massa. Per poter quindi operare il bilancio di energia per unità di volume si esegue la seguente conversione,

$$\varepsilon_c = 3.969 \cdot E_{Bond} \cdot \rho_r$$

Il volume di detriti che sono sottoposti alla seconda frantumazione dipende essenzialmente dalla classificazione operata dalla funzione di allontanamento dei detriti.

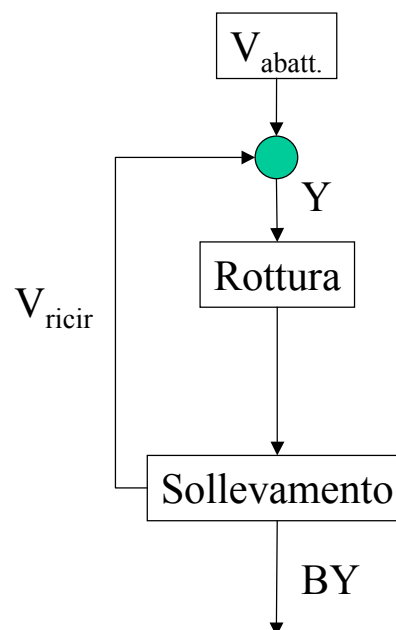


Figura 12 - Schema funzionale del processo di abbattimento e classificazione che avviene al fondo del foro.

Tale volume è ricavabile dalla espressione ottenuta dal bilancio di materia nel sistema,

$$V_{ricir} = V_{abatt.} \cdot \frac{(1-B)}{B}$$

dove $V_{abatt.}$ è il volume di solido abbattuto e B è l'efficienza di rimozione. Ne segue che l'energia di comminazione sarà data dalla seguente espressione,

$$E_c = A_{foro} \cdot h \cdot \frac{(1-B)}{B} \cdot \varepsilon_c$$

Si può quindi scrivere il bilancio di energia completo,

$$E_t = A_{foro} \cdot h \cdot \left(\varepsilon_p + \varepsilon_f + \frac{1-B}{B} \varepsilon_c \right)$$

In tale bilancio appare una sola incognita che è l'avanzamento h .

Passando in termini di potenza, necessaria all'abbattimento, si ottiene la seguente relazione che consente di conoscere la velocità di avanzamento

$$W_t = A_{foro} \cdot v_a \cdot \left(\varepsilon_p + \varepsilon_f + \frac{1-B}{B} \varepsilon_c \right)$$

Sostituendo alla potenza trasmessa la potenza fornita dalla macchina pneumatica (1.13) ricaviamo la velocità di avanzamento della stessa,

$$v_a = \frac{W \cdot \eta_a}{A_{foro} \left(\varepsilon_p + \varepsilon_f + \frac{1-B}{B} \varepsilon_c \right)}$$

E' interessante avere un'idea di come varia la velocità di avanzamento con l'efficienza di sollevamento dei detriti B . In figura 13 è riportata la velocità di avanzamento in funzione dell'efficienza B . Si può constatare come la velocità di avanzamento decresca molto rapidamente riducendosi da circa 240 m/h nel caso di rendimenti prossimi all'unità, e a circa 7 m/h per rendimenti pari a 0.5.

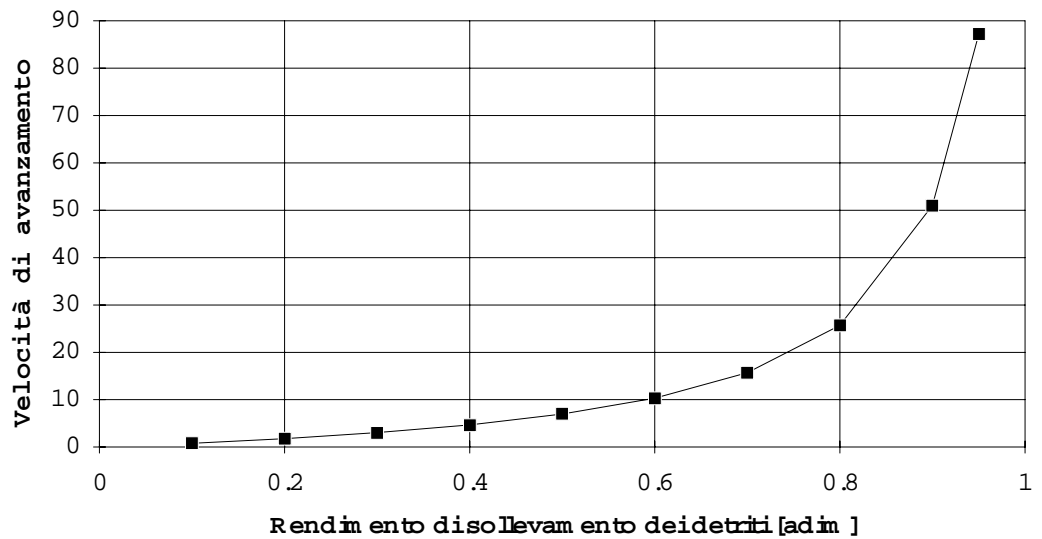


Figura 13 - Velocità di avanzamento in funzione del rendimento di sollevamento dei detriti

2.2 Funzione allontanamento dei detriti

La funzione che si attua immediatamente a valle dell'abbattimento è l'allontanamento dei detriti dal fondo del foro. Come accennato in precedenza (§ 2.2) tale operazione ha un effetto diretto sul rendimento complessivo della perforazione riducendo in modo drastico la velocità di avanzamento.

Come si può realizzare tale operazione? Anticipiamo le possibili soluzioni e poi le descriveremo. Il sollevamento dei detriti si può ottenere in due modalità:

- meccanicamente, ovvero con l'ausilio di utensili o quant'altro che prendono in carico il materiale e lo allontanano dal fronte di scavo;
- idraulicamente, ovvero con l'impiego di un fluido che si fa carico dei detriti e li trasporta all'esterno del foro.

Si possono differenziare anche per la continuità nel tempo dell'operazione. Si distinguono quindi metodi continui e discontinui. Questi ultimi sono solo di tipo meccanico.

2.2.1 Sollevamento meccanico

Il sollevamento meccanico si può distinguere fondamentalmente per la modalità della successione delle operazioni elementari nel corso della perforazione.

Se le operazioni elementari si svolgono in **serie** avremo un sistema di sollevamento **discontinuo** mentre se le operazioni elementari si svolgono in **parallelo** avremo un sistema di sollevamento **continuo**. La **discontinuità** delle operazioni si riflette nella classica sequenza che si

adotta in un qualsiasi scavo. Ogni operazione è **sequenziale** e prevede il completamento o l'interruzione dell'attività per procedere alla seguente. La **tempistica** che si ottiene è fortemente condizionata dalla riuscita delle singole attività

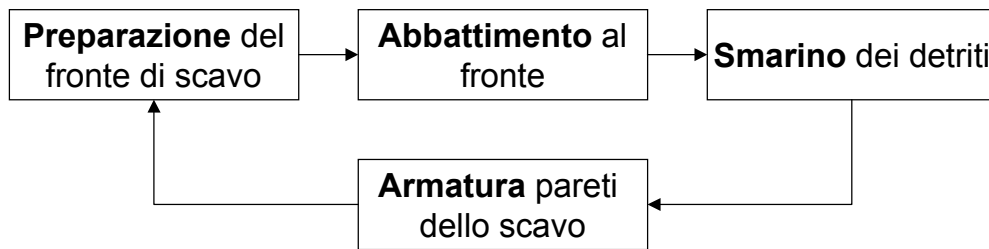


Figura 14 - Sequenza delle operazioni elementari di scavo

La **continuità** delle attività è una caratteristica di processi in **parallelo**. In questo caso le operazioni si svolgono **simultaneamente** consentendo una **velocizzazione** dell'intero processo. Si ha nel caso di operazioni in parallelo l'individuazione di una **attività critica** che condiziona la riuscita dell'intero processo. Il sollevamento meccanico **discontinuo** consiste nell'asportazione dei detriti di scavo tramite l'impiego di un adeguato **utensile**

L'utensile sarà formato:

- da un **corpo** che ospita il materiale da rimuovere
- da un dispositivo di **chiusura** del fondo e
- da una **connessione** al sistema di sollevamento

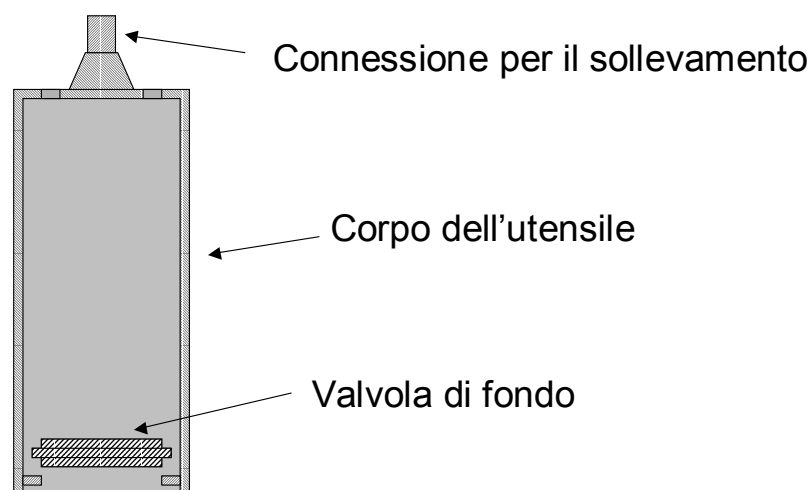


Figura 15 – Schema di utensile per la rimozione meccanica dei detriti

L'efficienza dei sistemi di sollevamento di questo tipo è influenzata dai seguenti fattori:

- Luce di apertura della valvola

- Facilità del rifluimento del materiale nel corpo utensile
- Tenuta alla chiusura della valvola
- Presenza di volumi morti al piede

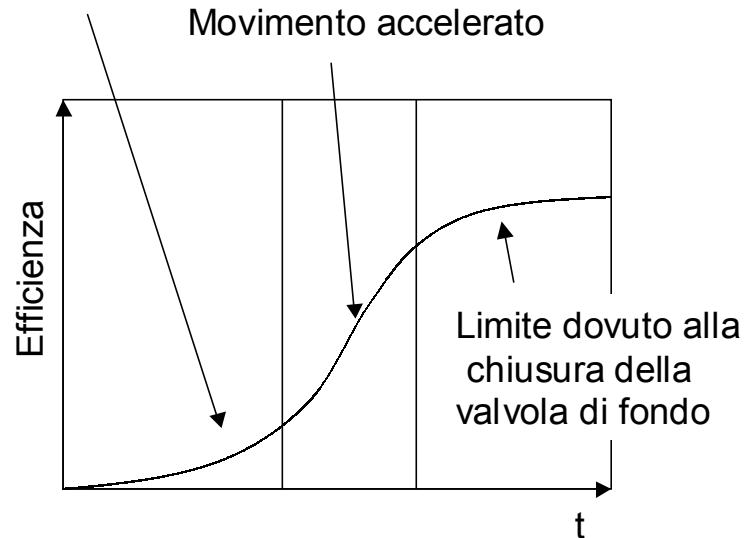


Figura 16 – Efficienza di rimozione in funzione del tempo dell'operazione

L'**efficienza** è medio-bassa e dipende dal **tempo** impiegato nelle operazioni.

Pro

- facilità d'impiego;
- basso costo;

Contro

- efficienza bassa;
- effetto di pistonamento in foro;
- tempi operativi lunghi.

Il sistema di sollevamento **continuo** dei detriti si avvale di un opportuno sistema meccanico che consente di sollevare il materiale abbattuto simultaneamente all'abbattimento di nuovo materiale.

Il sistema meccanico sarà formato:

- da una struttura continua che collega il fondo del foro con la superficie;
- da un dispositivo che consente la risalita del materiale lungo la struttura stessa.

Il sistema di sollevamento di questo tipo è costituito dalle aste elicoidali. Queste sono costituite da un corpo tubolare centrale, che svolge la funzione di sostegno e di connessione tra un'asta e l'altra, e da una superficie di forma elicoidale che si sviluppa lungo il corpo centrale. Di fatto corrispondono alla geometria della coclea di Archimede con la differenza che lavorano con l'asse verticale anziché inclinato.

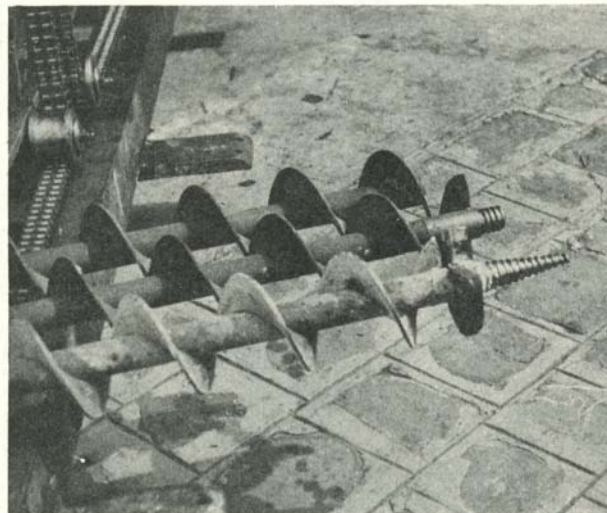
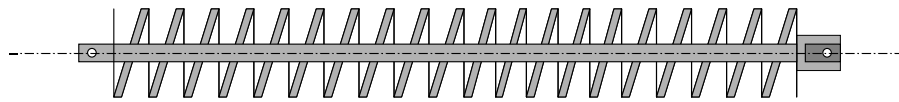


Figura 17 – Aste elicoidali

Le condizioni di funzionamento differiscono dalla coclea che ha la sola funzione di spostare il materiale verso l'alto consentendo allo stesso di stare poggiato sulla parete. Nel caso delle aste il materiale viene ospitato a bordo dell'asta e deve:

- in condizioni statiche rimanere sull'elica;
- in condizioni dinamiche spostarsi verso l'alto.

La stabilità sulla vite o elica è assicurata dall'attrito che si sviluppa al contatto e che deve essere prevalente sulla componente della forza peso.

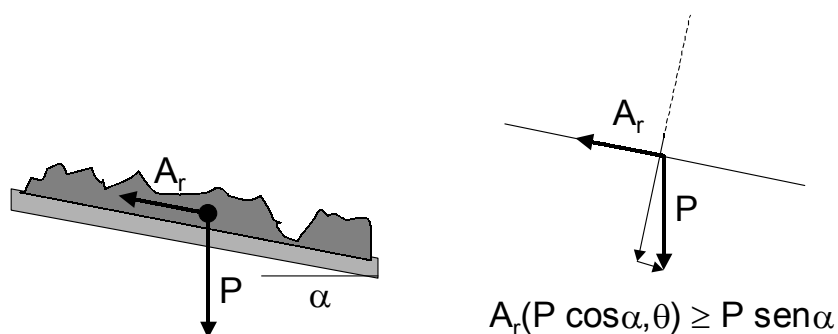


Figura 18 – Condizioni statiche: bilancio delle forze agenti

Questo equilibrio dipende dall'angolo della vite, e quindi dal suo passo, dalla quantità di materiale sulla vite e dal suo angolo di attrito interno.

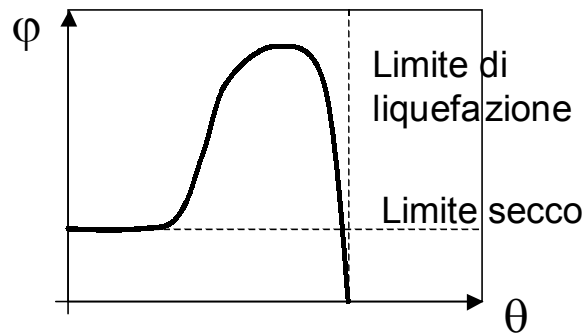


Figura 19 – Angolo di attrito interno di un terreno non coesivo in funzione del grado di umidità

L'angolo di attrito interno dipende inoltre dal grado di umidità del terreno. Se si supera il limite di liquefazione non si può tenere il materiale poiché fluisce.

In condizioni dinamiche si deve considerare la spinta del terreno che viene accolto sull'elica e che tende a spostare il materiale già sulla vite.

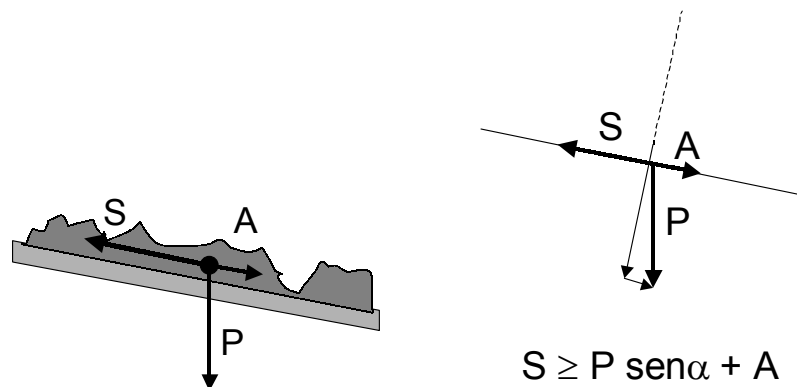


Figura 20 - Condizioni dinamiche: bilancio delle forze agenti

Le condizioni per cui si abbia il movimento sono una spinta che vinca sia la componente di attrito tra terreno e vite sia la componente della forza peso sul piano della vite stessa.

In entrambi i casi è fondamentale la geometria dell'elica che è riassunta nell'angolo del piano della vite rispetto all'orizzontale. Si può così riassumere:

- Maggiore è α minore il volume di detriti sulla vite
- Minore è α
 - più lungo è il percorso

- maggiore è l'attrito che si sviluppa sia sulla vite che sulle pareti
 - maggiore spinta necessaria per muovere il materiale
- Maggiore è θ maggiore è il peso
 - α maggiori L'efficienza del sollevamento continuo dei detriti è **medio-alta**. E' influenzata da:
 1. grado di umidità dei detriti;
 2. vibrazioni dell'impianto, velocità di rotazione, ecc.;
 3. convergenza delle pareti del foro;
 4. presenza di formazioni coesive;
 5. gioco tra diametro del foro e della vite.

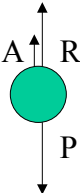
2.2.2 Sollevamento idraulico

Il sollevamento di tipo "idraulico" ha ad esempio il caso nel quale per rimuovere i detriti dal fondo del foro realizzato con un trapano si soffi, rischiando di ricevere le polveri negli occhi. Qual è il meccanismo che consente di rimuovere i detriti ?

Perché una particella solida possa essere trasportata da un fluido in moto la velocità di flusso deve essere sufficientemente elevata affinché la particella stessa non venga deposta.

Andiamo quindi ad analizzare il comportamento di una particella solida immersa in un fluido.

Consideriamo inizialmente la condizione di staticità del fluido. In tali condizioni le particelle sono soggette al campo di forza gravitazionale. Scriviamo il bilancio di forze per una particella sferica,

$$m \frac{dv}{dt} = P - A - R$$


The diagram shows a green sphere representing a particle. Three force vectors are shown: an upward arrow labeled 'A', another upward arrow labeled 'R', and a downward arrow labeled 'P'.

dove P è la forza peso, A è la spinta di Archimede e R la resistenza viscosa o di Stokes. Da cui,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} g - \frac{3}{4} C_d \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{v^2}{d_p}$$

e considerando che la massima velocità (velocità limite) viene raggiunta quando l'accelerazione si annulla si ottiene,

$$v_{\text{lim}} = \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} g d_p \frac{4}{3} \frac{1}{C_d} \right)^{1/2}$$

Quindi la particella si muoverà verso il basso con una velocità massima che dipende:

- dalla differenza di densità tra solido e fluido;
- dalla dimensione caratteristica della particella;
- dal coefficiente di resistenza C_d .

Il coefficiente di resistenza C_d dipende da v_p , ed in particolare,

$$\begin{cases} C_d = \frac{24}{Re_p} & \text{se } Re_p < 10 \\ C_d = 0.44 & \text{se } Re_p > 100 \end{cases}$$

avendo assunto la particella forma sferica ed essendo

$$Re_p = \frac{\rho_f \cdot v_p \cdot d}{\mu_f}$$

dove μ_f è la viscosità dinamica del fluido.

Quest'ultimo dipende dal numero di Reynolds della particella e dalla sfericità della medesima. Infatti il coefficiente di resistenza C_d diminuisce all'aumentare del numero di Reynolds e aumenta al diminuire della sfericità ψ .

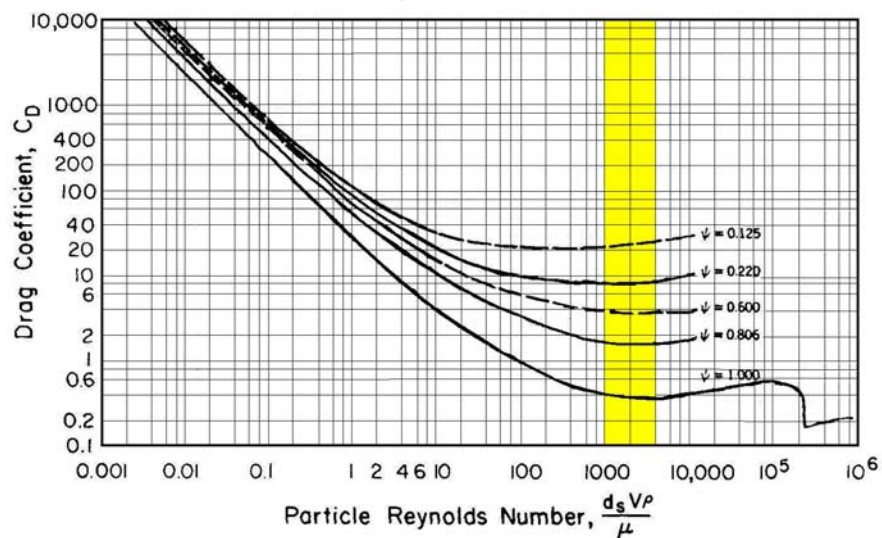


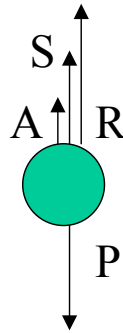
Figura 21 – Coefficiente di resistenza al moto per particelle solide

Passando ad analizzare cosa accade in condizioni dinamiche è necessario considerare nel bilancio di forze anche la componente di spinta dovuta al flusso del fluido che si contrappone alla forza peso esprimibile,

$$S = C_s A \rho_f \frac{v_f^2}{2}$$

dove $C_s \approx C_d$

Scriviamo il bilancio di forze per una particella sferica assumendo che essa si muova verso il basso,



$$m \frac{dv}{dt} = P - A - R - S$$

da cui,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} g - \frac{3}{4} C_d \frac{\rho_f v_p^2}{\rho_p d_p} - \frac{3}{4} \frac{\rho_f v_f^2}{\rho_p d_p} C_s$$

e considerando la velocità limite si ottiene,

$$v_p = \frac{C_s}{C_d} v_f - \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} g d_p \frac{4}{3} \frac{1}{C_d}}$$

Quindi perché la particella venga sollevata si deve avere

$$v_p = v_{\text{lim}} - v_f \leq 0 \quad \Rightarrow \quad v_f > v_{\text{lim}}(d_p, \rho_f, \rho_p)$$

La velocità del fluido deve essere almeno il doppio di quella di sedimentazione. Per migliorare il sollevamento si può agire sulla coppia di densità solido-fluido. Per cui l'impiego di fluidi a densità maggiore favoriscono il sollevamento delle particelle a parità degli altri parametri.

Un aspetto importante sull'efficienza del sollevamento dei detriti lo svolge il regime di moto che si instaura nel condotto. Infatti per mantenere una efficienza elevata è necessario mantenersi in un regime di moto di tipo turbolento poiché il profilo di velocità che si ottiene presenta un volume maggiore nel quale si ha una velocità di flusso maggiore della velocità minima di sollevamento rispetto ad un profilo in regime laminare.

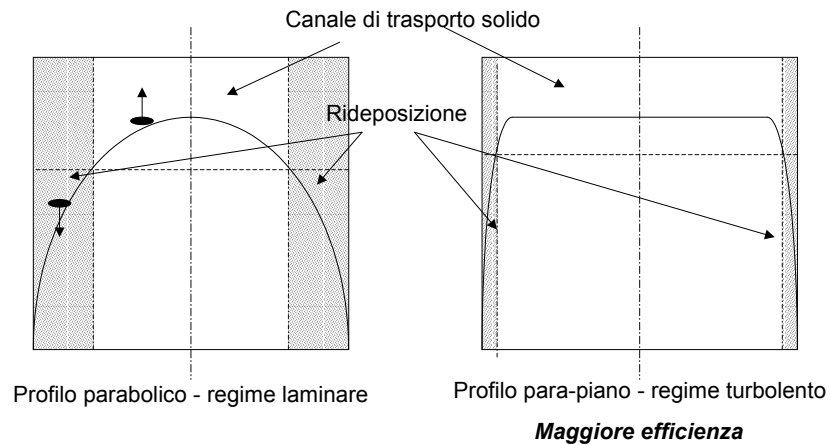


Figura 22 – Profilo della velocità in un canale ed efficienza di trasporto solido

Il sollevamento idraulico dei detriti ha in generale un'efficienza medio-alta. I parametri da cui dipende sono:

- la granulometria dei detriti e la loro forma;
- la densità del materiale abbattuto;
- la densità e viscosità del fluido di sollevamento;
- la velocità di risalita del fluido medesimo;
- il profilo di velocità nel condotto;
- il diametro del foro e della batteria di perforazione.

2.3 Funzione sostegno delle pareti

2.3.1 Stato di sollecitazione naturale

In una formazione rocciosa omogenea le direzioni principali dello stato tensionale possono essere assunte rispettivamente orizzontali e verticali, per motivi di simmetria. La sollecitazione verticale S_v è pari a,

$$S_v = \gamma H = \rho g H$$

dove γ è il peso specifico medio dei terreni sovrastanti e H è la profondità del punto in esame.

Per quello che riguarda la sollecitazione orizzontale, S_h , questa risulta funzione di S_v ma indeterminata. Si può scrivere,

$$S_h = K_o \cdot S_v$$

dove K_o è noto nella meccanica delle terre come il **coefficiente di spinta a riposo** e deve essere valutato sperimentalmente. Questo coefficiente è

comunque limitato superiormente dal legame tra le sollecitazioni principali che è, assunto sempre un criterio di rottura di Mohr-Coulomb,

$$\sigma_1 = 2c\sqrt{N\varphi} + N\varphi \cdot \sigma_3$$

Si possono verificare due casi. Se σ_1 coincide con la S_v si ha,

$$K_o \geq \frac{1}{N\varphi} - \frac{2c\sqrt{N\varphi}}{N\varphi \cdot S_v} = K_a$$

Questo valore corrisponde al limite inferiore di K_o noto come **coefficiente di spinta attiva K_a** .

Se invece σ_1 coincide con S_h si ha,

$$K_o \leq \frac{1}{N\varphi} + \frac{2c\sqrt{N\varphi}}{N\varphi \cdot S_v} = K_p$$

In questo caso il limite di K_o è quello superiore e corrisponde al **coefficiente di spinta passiva K_p** .

Un approccio alternativo è il seguente. Si considera una formazione omogenea ed indefinita; in tale caso la deformazione orizzontale deve essere nulla. Imponendo tale condizione si ricava,

$$S_h = \frac{\nu}{1-\nu} S_v$$

ad esempio se si assume $\nu=0.25$ risulta $K_o = 1/3$. Il ragionamento sarebbe valido per una formazione già solida al momento della genesi, che venisse progressivamente ricoperta da una coltre di sedimenti senza che tale processo ne alteri le proprietà.

La situazione è tuttavia più complessa e risulta differente a seconda dell'origine del terreno. Si dà notizia qui di seguito che il K_o può assumere valori anche maggiori di 1, riscontrati nel caso di formazioni per effetto del deposito e della successiva erosione.

2.3.2 Stato di sollecitazione indotto dallo scavo

Lo scavo in un ammasso produce un disturbo delle condizioni di stabilità iniziali. Un campo di sforzi locale si sviluppa attorno al foro con la massima concentrazione sulle pareti.

Fattori naturali iniziano a lavorare per riportare il sistema in una condizione di equilibrio. La distribuzione delle pressioni perde il carattere idrostatico e si sviluppa un sistema tridimensionale di sollecitazioni.

Quando la resistenza del materiale è insufficiente a contrastare le sollecitazioni imposte, una zona con sforzi ridotti si forma in prossimità del foro. In tale zona le deformazioni assumono tutte le possibili tipologie di tipo non elastico. È importante riuscire a capire il comportamento del materiale all'intorno del foro poiché influenza la stabilità delle pareti.

Considerando una rappresentazione in coordinate cilindriche (r, θ) ed un foro di raggio a in un mezzo indefinito con sollecitazione originaria isotropa S_h , le sollecitazioni radiale e tangenziale si possono scrivere come segue,

$$\sigma_r = S_h \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad \sigma_\theta = S_h \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right)$$

Caratterizzando il mezzo con un angolo di attrito ad una coesione si può scrivere per la sollecitazione originaria esercitata dai terreni:

$$S_h = p_r = \frac{\rho g h (1 - \sin \varphi) - 2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

La condizione di stabilità è assicurata fino alla profondità:

$$h_k = \frac{2c \cos \varphi}{\rho_r g (1 - \sin \varphi)}$$

Di conseguenza si considera che l'ammasso non eserciti alcuna pressione sui rivestimenti fino alla profondità h_k .

Si consideri un mezzo ideale per il quale si assume valida la legge di Hooke fino al limite di plasticizzazione. Si assume che nella zona di plasticizzazione il comportamento dei materiali sia assimilabile ad un mezzo non consolidato dotato di un angolo di attrito interno e coesione nulla. Gli sforzi procedendo dalla zona vergine verso la parete del foro tendono ad aumentare secondo le espressioni precedenti partendo dal valore S_h . Al contorno della zona di deformazione non elastica si ha un massimo corrispondente alla condizione:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \sigma_f = c$$

Applicando tale condizione si può determinare il raggio della zona plasticizzata:

$$R = a^{k-2} \sqrt{\frac{2\rho g h}{k(k-1)p_k}}$$

dove $k = 2/(1 - \sin(\varphi))$ e p_k è la pressione esercitata sul rivestimento.

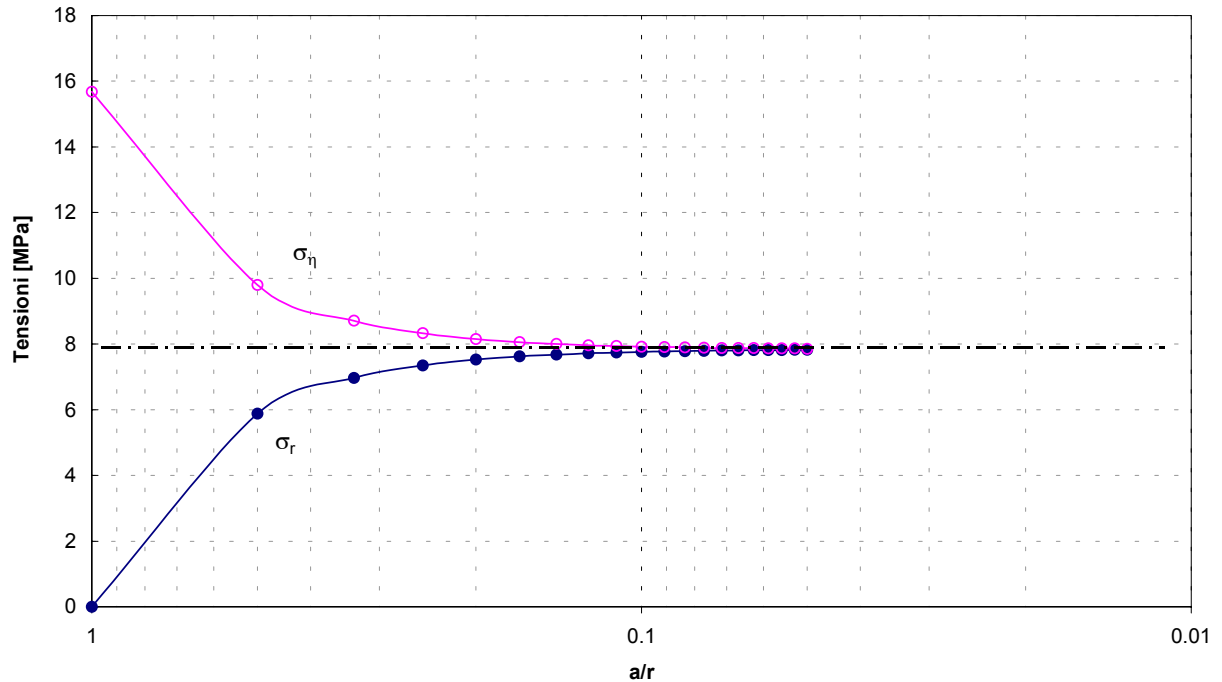


Figura 23 – Andamento delle sollecitazioni attorno al foro

La determinazione del raggio della zona plasticizzata può essere determinato nel caso di un mezzo dotato di coesione dalla relazione:

$$R = a \left[\frac{(S_h - c)(1 - k)}{(p_k - c)} \right]^{\frac{1-k}{2k}}$$

dove $k = \sin\varphi$ e p_k è la pressione esercitata sul rivestimento.

Questo valore del raggio corrisponde al valore finale ma la sua evoluzione è progressiva e dipende dalle proprietà viscosi del mezzo. La variazione nel tempo è data dalla relazione:

$$R(t) = a + \left\{ a \left[\frac{(S_h - c)(1 - k)}{(p_k - c)} \right]^{\frac{1-k}{2k}} - a \right\} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \right]$$

dove t_0 è il tempo di rilassamento degli sforzi.

La velocità con cui si ha la convergenza delle pareti è possibile determinarla con l'equazione di Hiramatsa e Oka:

$$v = B \frac{\sin\varphi}{1 + \sin\varphi} a^{\frac{2\sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} (p_k - \sigma_t) \left(R^{\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} - a^{\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} \right)$$

dove B è un coefficiente di proporzionalità che dipende da r, φ ed il tempo e σ_t è la resistenza a trazione. Si evidenzia come la velocità di convergenza delle pareti dipende dal raggio della zona plasticizzata nonché dall'angolo d'attrito interno del materiale ma anche dalla pressione esercitata dai supporti.

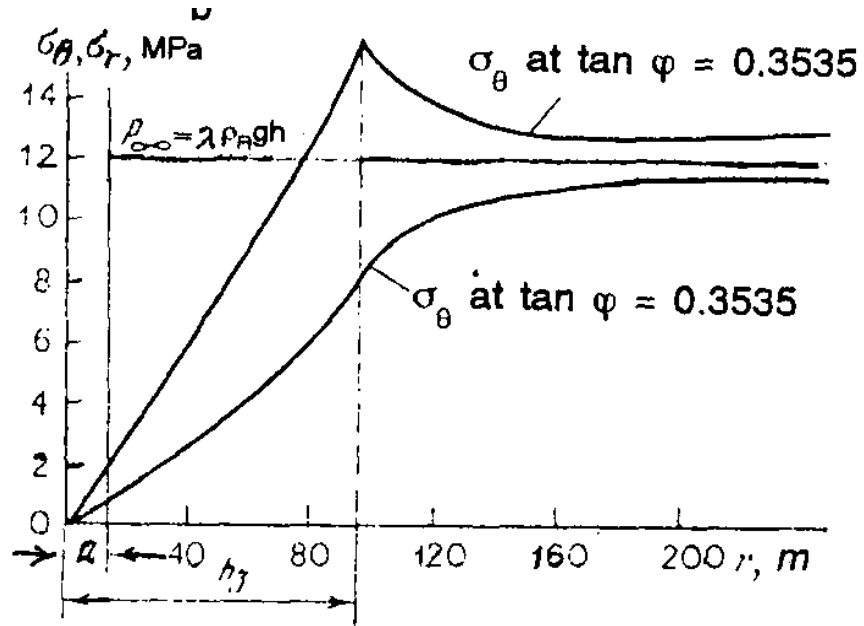


Figura 24 - Andamento degli sforzi nella zona plasticizzata ed oltre

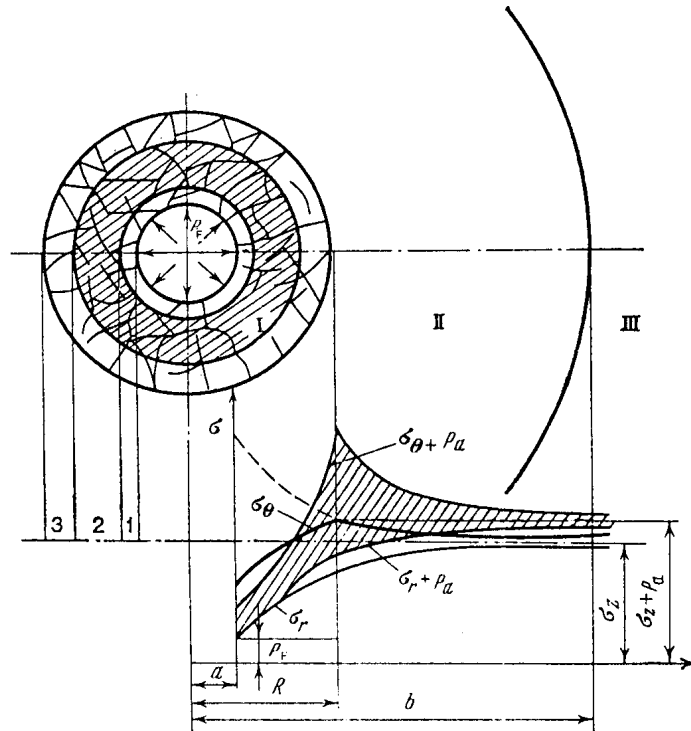


Figura 25 -

Dai precedenti sviluppi appare chiaro che per ridurre la zona plasticizzata è necessario esercitare una pressione sulle pareti già in fase di scavo. Ed inoltre dato il carattere viscoso delle deformazioni dei terreni è necessario procedere il più rapidamente possibile per evitare l'estensione della zona allentata. Si intravedono quindi due possibili interventi in fase di perforazione da effettuare sono quelli di mettere in opera un rivestimento per esercitare una pressione sulle pareti e contenere la convergenza delle pareti e di effettuare tale operazione il prima possibile.

2.3.3 Tipologia dei rivestimenti

Le opere che si possono approntare per contenere la convergenza delle pareti possono essere:

- provvisori, o
- definitivi

Si possono distinguere inoltre per meccanismo di stabilizzazione adottata

- meccanici
- "idraulici"

Il rivestimento è pensato per poter contrastare la spinta del terreno e contenere il materiale della fascia allentata che altrimenti franerebbe, di

conseguenza deve assicurare di poter resistere alla pressione esercitata dai terreni. Questa azione si può realizzare sia con sistemi passivi (meccanici) sia attivi (“idraulici”)

2.3.3.1 Rivestimenti meccanici

Il rivestimento **meccanico** è costituito da una camicia metallica o plastica di diametro inferiore a quello del foro. Essa ha un comportamento passivo, poiché contiene le spinte attive dei terreni alle sue spalle. Il carico è progressivo nel tempo man mano che si ha la convergenza delle pareti. Il rivestimento meccanico può essere sia temporaneo che definitivo. Qualora sia temporaneo si deve tener presente la necessità di rimuoverlo prima di installare quello definitivo. Per assicurarsi di poterlo rimuovere è necessario tener presente la spinta esercitata dal terreno e di conseguenza l'attrito lungo le pareti del tubo. È quest'ultimo che deve essere vinto la tiro esercitato con l'argano.

I tubaggi o *casings* sono caratterizzati dal diametro esterno (OD), dal diametro interno (ID) e dal diametro minimo interno (*drift diameter*). La lunghezza è definita sulla base della massima lunghezza trasportabile (3-6 m). La disponibilità dei diametri commerciali è regolata dalle norme ISO o API. In figura 26 sono riportati i diametri e gli spessori dei materiali secondo normative. Oltre alle caratteristiche geometriche sono importanti ai fini della verifica alla resistenza meccanica i materiali con i quali sono realizzati le tubaggi: la scelta del *grade*.

Figura 26 – Tabelle tubaggi

I *casings* sono giuntati sia per saldatura che per mezzo di giunti filettati. Questi ultimi possono essere realizzati sia direttamente sui tubi stessi sia a parte e poi saldati al tubo. I giunti devono assicurare oltre alla resistenza meccanica anche la tenuta idraulica che si può avere sia attraverso il filetto, con una opportuna forma, o con dei contatti metallo-metallo.

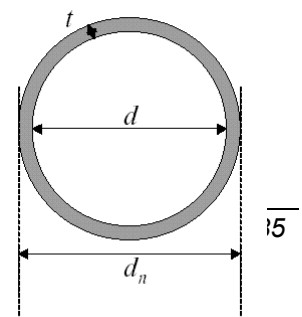
Per progettare un *casing* affidabile è necessario valutare la resistenza meccanica della tubazione nelle diverse condizioni di carico che si possono presentare.

Le condizioni di rottura meccanica più importanti sono:

- rottura per trazione sia sul corpo che sul giunto;
- rottura per esplosione (o scoppio) dovuta alla pressione interna;
- rottura per collasso dovuta alla pressione esterna.

Nel caso della **rottura per trazione**, che avviene nel corso della movimentazione dei tubaggi con l'argano, la resistenza meccanica viene valutata con la semplice espressione:

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot \sigma_{amm} \cdot (d_n^2 - d^2)$$



dove: d_n è il diametro nominale o diametro esterno

d è il diametro interno

σ_{amm} è la tensione ammissibile del materiale

Nel caso di una pressione interna maggiore della pressione esterna si ha una **rottura per esplosione**. Questa situazione di carico si verifica nel caso di un ingresso all'interno del pozzo di una pressione di formazione maggiore della pressione esercitata dal fluido di perforazione e della contemporanea chiusura della testa pozzo per evitare una fuoriuscita dei fluidi (eruzione del pozzo). Il calcolo della resistenza meccanica è affidato alla relazione:

$$P_{br} = 0.875 \cdot \frac{2\sigma_{amm} \cdot t}{d_n}$$

dove t è lo spessore della tubazione.

Nel caso in cui sia la pressione esterna ad essere maggiore di quella interna si ha una rottura per schiacciamento. È questo il caso classico del collasso dei pozzi dovuti ad un carico dei terreni eccessivo o per un eccessivo abbassamento della pressione interna (pompaggio). In questo caso si distinguono 4 tipi di collassi:

- per superamento della resistenza di soglia;
- in campo plastico;
- transizione;
- in campo elastico.

La differente tipologia di collasso avviene in funzione del rapporto d_n/t detto coefficiente di "sottigliezza". In funzione di tale rapporto e del tipo di materiale impiegato, esistono delle tabelle (fig. 27), costruite anche su base empirica, che indicano il tipo di collasso cui si va incontro e quindi l'equazione da utilizzare per la verifica.

Tipo	Resistenza di soglia	Plastico	Transizione	Elastico
H-40	16.40	27.01	42.64	
C-90	13.01	21.69	29.18	
P-110	12.44	20.41	26.22	

Figura 27 - Esempio di tabella indicante la tipologia di collasso in funzione del tipo di materiale e del coefficiente di sottigliezza.

Riportiamo di seguito le equazioni per le diverse tipologie di collasso:

- Resistenza di soglia:
$$p_{cr} = 2(\sigma_{amm})_e \left[\frac{d_n/t - 1}{(d_n/t)^2} \right]$$
- Campo plastico
$$p_{cr} = (\sigma_{amm})_e \left[\frac{F_1}{(d_n/t)} - F_2 \right] - F_3$$
- Transizione
$$p_{cr} = (\sigma_{amm})_e \left[\frac{F_4}{(d_n/t)} - F_5 \right]$$
- Campo elastico
$$p_{cr} = \frac{46.95 \times 10^6}{(d_n/t)(d_n/t - 1)^2}$$

L'impiego delle precedenti relazioni fa riferimento alla verifica della resistenza ad un solo carico. Questo approccio non è realistico in quanto si ha, in genere, il simultaneo insorgere di almeno due sollecitazioni sul tubaggio. In questo caso per valutare la reale resistenza è necessario ricorrere all'impiego dell'ellisse di plasticità che consente di valutare il comportamento meccanico di un tubaggio sotto l'azione contemporanea di un carico longitudinale ed uno radiale.

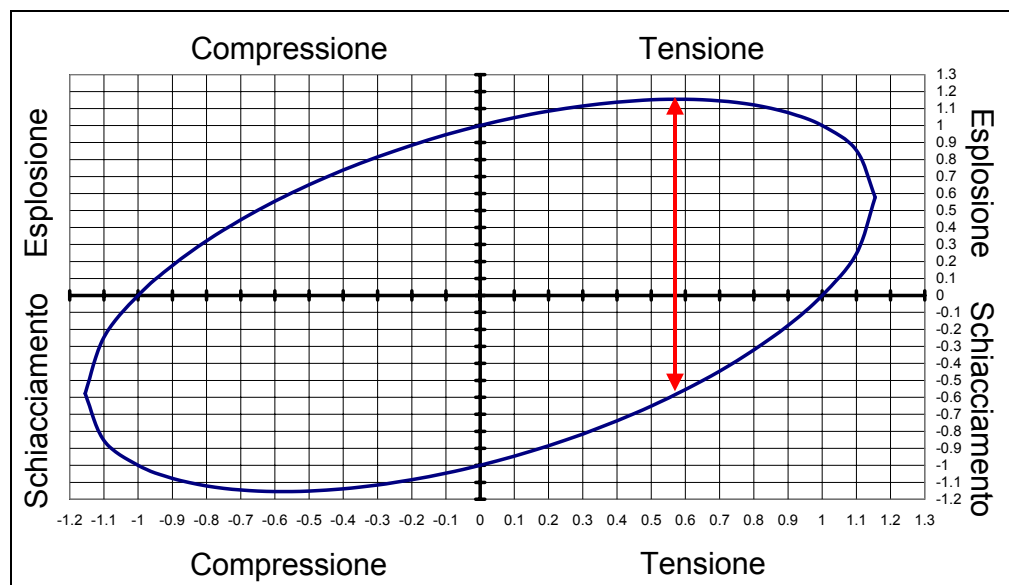


Figura 28 - Ellisse di plasticità

Dalla figura 28 si può vedere come in alcuni campi la resistenza meccanica è maggiore di quella dovuta alla sola azione di una di esse, ed in altri casi è inferiore.

2.3.3.2 Rivestimenti idraulici

Il rivestimento **idraulico** è un metodo temporaneo di contenimento delle pressioni ed esercita un'azione stabilizzante sulla fascia allentata di terreno solo e solo se la sua messa in opera è a regola d'arte. Il meccanismo di messa in posto è relativamente semplice e necessita di qualche ulteriore

approfondimento. Il principio di funzionamento appartiene ai sistemi attivi ovvero che esercitano loro stessi una azione in direzione opposta alla convergenza delle pareti. Per poter imprimere una spinta sulla parete si può impiegare una colonna di fluido. Applicando una pressione con una colonna e.g. di acqua si ottiene però anche un effetto di filtrazione dell'acqua stessa nel terreno. È quindi necessario avere un rivestimento che consenta di esercitare la spinta della colonna fluida sulla parete senza indurre nessuna filtrazione.

2.3.4 La formazione del pannello di fango

Quando si perfora un pozzo utilizzando il metodo a rotazione a circolazione diretta di fluido, il fango di perforazione viene pompato attraverso le aste fino allo scalpello per poi tornare in superficie passando nella intercapedine anulare aste-foro; caratteristica fondamentale della perforazione a rotazione è infatti l'allontanamento continuo del materiale abbattuto dal fondo del foro.

Nota Il fango di perforazione è una sospensione colloidale costituita da due fasi: la fase liquida, generalmente costituita da acqua, dolce o salata, o da olio; la fase solida che comprende a sua volta sostanze colloidali minerali, argille in genere e bentonite in particolare, o organiche (amidi ad esempio), e sostanze inerti tra cui i detriti di perforazione e materiali in polvere aggiunti al fango appositamente per aumentarne il peso specifico (barite, galena, siderite). Il fango di perforazione assolve molto bene a tutte le funzioni che sono richieste ad un fluido di perforazione. Esso infatti raffredda lo scalpello, lo lubrifica (con le particelle argillose in sospensione) e facilita la risalita dei detriti in superficie, inoltre la densità del fango è regolata in modo che esso eserciti, in ogni sezione del foro, una pressione superiore a quella dei fluidi contenuti nelle formazioni attraversate (di diverse centinaia di psi), in modo da impedirne l'ingresso in foro e favorire la stabilità delle pareti stesse del pozzo.

Quando si perfora in una formazione porosa e permeabile la differenza di pressione esistente tra la colonna di fango e la formazione causa la filtrazione della parte liquida del fango (filtrato di fango) all'interno della formazione, con una conseguente deposizione della parte solida sulle pareti del foro e formazione del pannello di fango, o *mud cake*.

Cominciamo con l'esaminare la filtrazione e il meccanismo di formazione del pannello di fango.

La perdita di fluido verso la formazione avviene in due fasi: la prima è indicata come "spurt invasion" vale a dire un'invasione brusca, improvvisa; si verifica nel momento in cui lo scalpello espone per la prima volta al contatto col fango di perforazione la roccia appena perforata; la seconda è la filtrazione vera e propria e ha inizio non appena comincia il processo di formazione del pannello di fango.

Nella prima fase ("spurt" invasion) si ha la migrazione del fango dal foro verso l'interno della formazione permeabile sotto l'azione del salto di pressione esistente.

Le particelle solide in sospensione, sia argillose che inerti, vengono trascinate verso l'interno della formazione andando ad ostruirne i pori e i canalicoli esistenti; all'inizio sono le particelle di dimensioni maggiori ad essere arrestate nella migrazione verso l'interno, riducendo in tal modo le dimensioni dei pori; quindi sui vuoti di dimensioni ridotte che si sono formati vanno a fermarsi particelle via via più piccole dando luogo ad un

pannello di fango interno il cui processo di formazione é rapidissimo e richiede generalmente pochi secondi. Tale pannello di fango interno rappresenta dunque una barriera alla ulteriore penetrazione di particelle solide nella formazione.

In concomitanza le particelle solide vengono depositate sulle pareti del foro creando quel rivestimento impermeabile che é il pannello di fango esterno, o mud cake propriamente detto. Il suo spessore varia in funzione delle proprietà della formazione e del fango, della portata di circolazione e della pressione differenziale.

Nello stadio iniziale della filtrazione, durante la formazione del mud cake, il salto di pressione esistente si ripartirà sulla formazione ; via via che il pannello si va formando e la sua resistenza alla filtrazione aumenta, una percentuale sempre maggiore di tale salto si ripartirà sul pannello stesso.

La filtrazione che maggiormente interessa il nostro studio è quella radiale che può avvenire in due regimi diversi :

- 1) regime dinamico : si ha quando il fango di circolazione sta circolando
- 2) regime statico : si ha quando non c'è circolazione di fango, cioè la colonna di fango é ferma.

Subito dopo il passaggio dello scalpello, l'invasione improvvisa del fango ("spurt" invasion) e la formazione del pannello, si ha la filtrazione di tipo dinamico che proseguirà finché non ci sarà un arresto nella circolazione del fango (ad esempio durante la manovra di estrazione delle aste o durante l'esecuzione di misure geofisiche in foro).

Da questo momento la filtrazione proseguirà in condizioni statiche.

Quando il fango riprenderà a circolare inizierà una nuova fase di filtrazione dinamica fino ad un nuovo arresto della circolazione , e così via. Nella esecuzione di un foro si ha dunque una alternanza di filtrazioni dinamiche e statiche.

Oltre alla filtrazione radiale appena considerata esiste anche una filtrazione verticale che si ha subito al disotto dello scalpello; Ferguson e Klotz (1954)² hanno mostrato come si possa trascurare il contributo della filtrazione verticale sotto lo scalpello alla filtrazione totale. Tesi questa ribadita, più recentemente, da Phelps (1984)³ anche sulla base della considerazione che la filtrazione verticale al disotto dello scalpello interessa proprio quei terreni che verranno successivamente asportati dallo scalpello.

² Ferguson , C.K.,and Klotz, J.A., "Filtration from mud during drilling",Trans. AIME, 201,29, (1954).

³ Phelps,G.D.,Stewart,G.and Peden,J.M.,"Che analysis of che invaded zone characteristics and cheir influence on wireline log and well-test interpretation"Tech.Paper SPE 13287, 59, (1984).

Analizziamo ora in maggior dettaglio i due diversi regimi di filtrazione.

In condizioni statiche, ovvero quando la colonna di fango non è in movimento, il pannello di fango sulle pareti del foro si ispessisce gradualmente in quanto non c'è alcuna forza a contrastare le forze di filtrazione che spingono le particelle argillose e non in sospensione, verso la formazione; lo spessore del mud cake dovrebbe crescere fino a che il foro non si sia completamente riempito ⁴.

In realtà ciò non avviene: mano a mano che il pannello si ispessisce e si compatta aumenta la sua "resistenza" alla filtrazione a seguito della riduzione sia dell'area di filtrazione che della permeabilità del mud cake.

Questo aumento della resistenza provoca una diminuzione della portata di filtrazione che tenderà gradualmente ad annullarsi. Il salto di pressione è quasi interamente assorbito dal mud cake, perciò la permeabilità della formazione ha una influenza scarsa o nulla sulla portata della filtrazione statica ⁵.

Il mud cake depositato in condizioni statiche è estremamente difficile da erodere e la portata di filtrazione che si ha al riprendere della circolazione del fango contribuisce molto poco allo spessore del mud cake ⁶.

In condizioni dinamiche, oltre alle forze di filtrazione che tendono a depositare il mud cake compaiono forze di tipo idrodinamico che si manifestano attraverso una azione di taglio sul pannello e che tendono ad eroderlo fino ad arrivare ad una situazione di equilibrio nella quale rimangono costanti lo spessore, la resistenza alla filtrazione del pannello, la velocità e la portata di filtrazione; quest'ultima viene indicata come portata critica di invasione⁷.

Il flusso di filtrato attraverso la formazione dipende più dalle interazioni all'interfaccia fra fango e pannello di fango sulle pareti del foro che dalle proprietà della formazione come la permeabilità.

L'azione di taglio sul pannello dipende dalla portata di fango in foro, dalla sezione anulare aste-foro, dunque dal diametro delle aste a parità di diametro del foro, e soprattutto dalla condizione di regime laminare o turbolento.

⁴ Williams, M., "Radial filtration of drilling muds", Trans.AIME, 136, 57, (1940).

⁵ Donaldson, E.C., Chernoglazov, V., "Characterization of drilling mud fluid invasion", Trans. AIME, 281, 3, (1986).

⁶ Prokop, C.L., "Radial filtration of drilling mud", Trans.AIME, 195, 5, (1952).

⁷ Allen, D., Auzeais, F., Dussan, E., Goode, P., Ramakrishnan, T.S., Schwartz, L., Wilkinson, D., Fordham, E., Hammond, O., Williams, R., "Invasion Revisited", Oilfield Review, (1991), Williams, M., "Radial filtration of drilling muds", Trans.AIME, 136, 57, (1940), Prokop, C.L., "Radial filtration of drilling mud", Trans.AIME, 195, 5, (1952).

Si è osservato che un fluido in regime turbolento è più erosivo di uno in regime laminare. In regime turbolento l'erosione del mud cake aumenta approssimativamente con il quadrato della velocità di circolazione.

Ferguson e Klotz (1954)⁸ hanno analizzato il fenomeno della erosione ed hanno osservato che le forze idrodinamiche che dovrebbero asportare il pannello sono in realtà molto minori di quelle necessarie per vincere la forza di coesione del pannello di fango. Per spiegare queste osservazioni occorre tener conto delle proprietà tixotropiche del fango di perforazione.

La tixotropia è la caratteristica, presentata da una sospensione colloidale come il fango, di assumere una struttura semisolido quando si trova in condizioni di quiete e di passare allo stato di liquido quando è in movimento. In questo caso non si ha dunque una netta separazione tra fango di circolazione e mud cake ma un graduale aumento di concentrazione in solido al passaggio dall'uno all'altro.

Nella zona di transizione le forze di coesione sono molto più deboli di quelle nel mud cake ed è dunque proprio questa zona ad essere continuamente rimossa dalle forze idrodinamiche, mentre la parte più densa del mud cake rimane in posto.

Mano a mano che la perforazione procede e il foro diviene più profondo l'azione di taglio ad una fissata profondità tenderebbe a ridursi come mostrano Allen et al.(1991)⁹, con conseguente aumento dello spessore del mud cake e diminuzione della portata critica di invasione. Questo in virtù della successione nel tempo di tre diversi regimi di flusso: un flusso altamente turbolento in corrispondenza dei getti di fluido dello scalpello, un flusso turbolento in corrispondenza delle aste pesanti, immediatamente al di sopra dello scalpello, e che a causa di un diametro maggiore riducono la sezione anulare di deflusso, ed infine una condizione di flusso laminare in corrispondenza delle aste della batteria di perforazione. Il grafico di Fig. 29 descrive schematicamente quanto fin qui esposto: la "spurt" invasion, della durata di pochi secondi, quindi la filtrazione dinamica con l'elevata portata di filtrazione in corrispondenza del flusso turbolento vicino allo scalpello ed una minore portata di filtrazione nelle condizioni di moto laminare, infine il decadimento della portata di filtrazione nel momento in cui si instaura un regime statico.

Nel grafico viene considerato anche il passaggio degli stabilizzatori, strumenti atti alla centralizzazione della batteria di perforazione, che asportano, raschiandolo via, il pannello di fango appena formato; come si può vedere al loro passaggio la portata di filtrazione presenta un incremento.

⁸ Ferguson, C.K., and Klotz, J.A., "Filtration from mud during drilling", Trans. AIME, 201,29, (1954).

⁹ Allen, D., Auzerais, F., Dussan, E., Goode, P., Ramakrishnan, T.S., Schwartz, L., Wilkinson, D., Fordham, E., Hammond, O., Williams, R., "Invasion Revisited", Oilfield Review, (1991).

Figura 29 - Andamento in funzione del tempo della portata di filtrazione ad una fissata profondità in relazione alla successione di differenti regimi di flusso in foro.

La portata critica d'invasione è dunque una grandezza che caratterizza la condizione di equilibrio dinamico fra forze di filtrazione e forze di tipo idrodinamico; essa dunque rimane costante fintanto che permangono le condizioni alla base di tale equilibrio e cioè determinati valori della portata fluida di fango, della sezione di deflusso, del salto di pressione fra l'interno del foro e il terreno attraversato, e un determinato regime di deflusso. Nel momento in cui interviene un cambiamento in una di queste condizioni il sistema abbandona la condizione di equilibrio per tendere ad una nuova : conseguentemente variano lo spessore del pannello, la sua resistenza alla filtrazione e anche la portata di filtrazione fino al raggiungimento di un nuovo equilibrio in cui la nuova q_{crit} rimane costante.

Ad esempio al passaggio dal regime turbolento al regime laminare si avrà una diminuzione della azione di taglio sul pannello, dunque una minore erosione, e l'aumento dello spessore del mud cake con diminuzione della portata di filtrazione; allo stesso modo un aumento del salto di pressione comporterà un ispessimento del pannello con conseguente riduzione di permeabilità dello stesso e della q_{crit} .

Una eccezione a questo equilibrio si ha quando la permeabilità della formazione e il salto di pressione sono così bassi che la portata di filtrazione è inferiore alla portata critica di invasione; in questo caso non si ha formazione del pannello di fango in condizioni dinamiche e la portata di filtrazione dipende dalle proprietà della formazione come la permeabilità.

Da quanto detto si evince che la maggior parte della perdita di filtrato di fango verso la formazione si ha in condizioni di filtrazione dinamica e con una portata maggiore che in condizioni statiche.

2.4 Le tecniche di perforazione

Dalla applicazione dei principi sopra esposti è possibile derivare le possibili tecniche di perforazione.

Metodo	Movimento utensile	Trasmissione movimento		Disgregazione terreno	Asportazione detriti	Sostegno pareti	Profondità massima	Orientamento	Campi di impiego
		a corda	con aste						
Percussione	Alternativo			per urto	discontinua con culetta	con tubazione di manovra	200 m	verticale	pozzi per acqua, campionamenti, pali di fondazione
Rotazione	Rotativo	con aste		taglio, urto, urto e taglio, abrasione	continua con circolazione diretta di fango	con fango ^(*)	7-8000 m	Tutte le direzioni	Perforazioni in ogni tipo di terreno. Indagini geognostiche, campionature, pozzi per acqua, coltivazioni, fori da mina, iniezioni, prove idrauliche, pali di fondazione
					continua con circolazione diretta di acqua	senza ^(*)			
					continua con circolazione di aria	senza	500 m	Verticale	Perforazioni di grande diametro, pali di grande diametro, pozzi per acqua
					continua con circolazione inversa di liquido (fango o acqua)	senza o con fango	150 m		
		con motore fondo foro		urto e taglio, urto, abrasione	continua con aste elicoidali o discontinua	senza o con tubazione di manovra	200 m	Tutte le direzioni	indagini geognostiche, pali di fondazione, coltivazioni
			urto e taglio, urto, abrasione	continua con circolazione diretta di fango	con o senza fango	7-8000 m	Tutte le direzioni	usata nella realizzazione di fori devianti	
Combinato	Senza			urto di un "martello" sull'utensile	continua con circolazione di aria o di acqua	senza	100 m	Tutte le direzioni	Fori da mina, fori per bullonature, per iniezioni, per prove idrauliche, pozzi per acqua, indagini geognostiche

Principali caratteristiche dei metodi di perforazione

fonte: Sappa

Figura 30 – Principali caratteristiche dei metodi di perforazione



Figura 31 – Le diverse funzioni e rispettive metodologie che sottendono all'esecuzione di un pozzo

3 Impieghi dell'energia nella perforazione

3.1 Generale

Le principali funzioni che intervengono nella perforazione, e che richiedono l'impiego di energia, sono le seguenti:

- 1) funzione sollevamento;
- 2) funzione rotazione;
- 3) funzione circolazione;
- 4) funzione illuminazione;
- 5) funzione servizi ausiliari.

Le prime tre sono funzioni principali, le altre sono secondarie. La funzione illuminazione si presenta, infatti nei casi in cui il lavoro si svolge su turni continuativi ed acquista particolare importanza negli impianti di media e grande potenzialità nei quali è anche presente, e talvolta rilevante, la funzione "servizi ausiliari" rappresentata dalle pompe per la distribuzione di acqua e di gasolio, dai comandi idraulici o ad aria compressa, etc.

Nella Tabella che segue sono elencate le varie operazioni in cui intervengono le tre funzioni principali nei diversi metodi di perforazione.

<i>Operazione</i>	<i>Perforazione a percussione</i>	<i>Perforazione a rotazione e carotaggio</i>	<i>Perforazione a rotazione</i>	<i>Perforazione a roto-percussione</i>
Sollevamento	Sollevamento	Sollevamento	Sollevamento	Sollevamento
Disgregazione della roccia	Sollevamento	Rotazione	Rotazione	Circolazione
Allontanamento detriti	Sollevamento	Circolazione e sollevamento o rotazione e sollevamento	Circolazione o rotazione	Circolazione

La funzione sollevamento è presente in tutti i metodi di perforazione; le funzioni rotazione e circolazione caratterizzano la perforazione a rotazione.

Nella perforazione a percussione a corda la funzione sollevamento è continua, mentre nella rotazione e nella perforazione con metodo

combinato è discontinua in quanto l'avvitamento e lo svitamento delle aste ne provoca continue interruzioni. Negli impianti a rotazione con estrazione di nucleo, l'asportazione dei detriti (o della "carota") è saltuaria ed in questa operazione convergono le funzioni circolazione e sollevamento. Nella perforazione a rotazione a distruzione totale, invece, l'allontanamento dei detriti è continuo ed è svolto interamente o dalla funzione circolazione o dalla rotazione. Nella perforazione a rotazione a secco con estrazione saltuaria dei detriti, la funzione sollevamento è continua in quanto affidata ad una corda come nel caso della perforazione a percussione.

Nella perforazione a percussione la disgregazione della roccia avviene per urto dell'utensile sul terreno; l'utensile viene sollevato e fatto ricadere ritmicamente.

L'operazione di perforazione è quindi svolta dalla funzione sollevamento. Nella perforazione a rotazione la disgregazione del terreno è affidata alla funzione rotazione. Nel metodo combinato la disgregazione della roccia è ottenuta per energia d'urto, non prodotta però dall'utensile lasciato cadere da una certa altezza, ma da una massa battente, azionata, come vedremo, da un motore (idraulico, elettrico, a combustione interna, ad aria compressa).

Pertanto in questo tipo di perforazione la disgregazione del terreno non è strettamente svolta da una delle funzioni sopra citate. Per la trattazione analitica delle tre funzioni faremo riferimento alla perforazione a rotazione ("rotary") sia perché si tratta del metodo più diffuso di perforazione sia perché rimane facile trasferire agli altri metodi i concetti fondamentali che verranno esposti a proposito delle principali funzioni.

La funzione sollevamento, nella perforazione rotary, rappresenta una fase improduttiva, salvo casi particolari, come ad esempio, l'operazione di tubaggio. Le funzioni circolazione e rotazione sono, invece, funzioni produttive, nel senso che esse contribuiscono direttamente alla realizzazione di un foro.

Si dovrà, quindi, cercare di ottenere la massima efficienza in queste due ultime funzioni e ridurre al minimo indispensabile i tempi della funzione sollevamento. Ci si trova, però, di fronte a fattori che, se da un lato favoriscono le due funzioni attive, dall'altro sfavoriscono quella passiva. Così, ad esempio, l'impiego di aste di grande diametro interno favorisce la funzione circolazione (in quanto a parità di portata e di profondità produce le perdite di carico) e la funzione rotazione (in quanto consente la trasmissione, allo scalpello, di una coppia più elevata) ma, di contro sfavorisce in genere, la funzione sollevamento perché aumenta il peso della colonna di perforazione. Nel dimensionamento di un impianto è necessario, quindi, ricercare una soluzione di compromesso fra le varie funzioni principali. Inoltre dovrà essere tenuto presente il tipo di terreno da perforare con un determinato impianto. Così, ad esempio, un impianto destinato a perforare prevalentemente in terreni sciolti dovrà avere molto efficienti le funzioni circolazione e rotazione; dovrà, cioè, essere munito di aste di grande diametro interno anche se ciò potrà comportare un aggravio per la funzione sollevamento. Infatti, in presenza di terreni sciolti (coerenti e non) l'avanzamento dello scalpello sarà veloce e, quindi, elevato il volume

di detriti prodotti nell'unità di tempo, ed i detriti potranno avere grandi dimensioni, per cui sarà necessaria una elevata portata di liquido. D'altra parte, se da un lato le aste di grosso diametro hanno un peso che sfavorisce la funzione sollevamento, dall'altro e da attendersi, nella perforazione di terreni teneri a distruzione totale, che questa ultima funzione sia relativamente poco impegnata in quanto dovrebbero essere poco numerose le manovre di sollevamento della colonna di perforazione per il cambio dello scalpello.

Viceversa, nel caso di un impianto destinato a perforare prevalentemente in rocce lapidee o quando il programma di perforazione comprende frequenti o continue operazioni di carotaggio saranno numerose le manovre della colonna di perforazione o per cambio di scalpello o per recupero di campioni. In questi casi converrà ridurre il peso delle aste (e quindi la loro sezione), per non sfavorire eccessivamente la funzione sollevamento. D'altra parte, in presenza di materiali lapidei la velocità di avanzamento sarà relativamente bassa e modesto il volume di detriti prodotti nell'unità di tempo così come modesto sarà il volume di detrito prodotto dal carotiere; pertanto sarà sufficiente una circolazione di fluido con portata relativamente bassa e, quindi, la ridotta sezione delle aste non porterà un eccessivo aumento delle perdite di carico.

3.2 Funzione sollevamento

3.2.1 Potenza motrice teorica

La funzione sollevamento si esplica principalmente durante le manovre della colonna di perforazione necessarie per la sostituzione dell'utensile di perforazione o per il recupero di "campioni di terreno". Nel case di impianti a percussione a corda il sollevamento è una funzione continua. Nel case, invece, di impianti muniti di aste, le suddette manovre sono necessariamente discontinue in quanto il collegamento fra asta e asta è in genere realizzato con accoppiamento a vite. La funzione sollevamento può essere suddivisa in operazioni attive ed in operazioni passive. Le prime sono rappresentate dal sollevamento vero e proprio, le seconde dalle manovre di avvvitamento e svitamento delle aste. Sarà quindi, necessario disporre di attrezzature ausiliarie idonee ed efficienti per ridurre al minimo i tempi relativi a questo secondo tipo di operazioni. D'altra parte, i tempi di sollevamento vero e proprio dipendono, entro certi limiti, dalla potenza installata sull'impianto, per cui è opportuno esaminare in base a quali criteri può essere valutata la potenza necessaria per la funzione sollevamento.

Supponiamo di voler calcolare la potenza da applicare ad un argano di un impianto rotary destinato a perforare normalmente fino alla profondità A , con una data colonna di aste. Quando la perforazione avrà raggiunto la profondità A , la batteria di perforazione avrà una massa apparente (in quanto immersa nel fluido che riempie il foro) pari a M_m . Nell'ipotesi suddetta, poniamo che la massa M_m possa essere sollevata con la massima velocità ammissibile v_m^* . La potenza necessaria è :

$$P_m = M_m \cdot v_m^*$$

Tutta la manovra di estrazione delle aste potrà essere effettuata alla velocità v_m che è la massima consentita qualunque sia il peso al gancio. Cioè la potenza disponibile P_m sarà sempre sufficiente a garantire la velocità v_m . Dopo estratta la prima asta o la prima "lunghezza"⁴ il peso al gancio sarà $M_{n-1} < M_m$, essendo n il numero di aste o di "lunghezze" che costituiscono la colonna di perforazione. La potenza necessaria per sollevare la colonna alla velocità v_m è allora

$$P_{n-1} = M_{n-1} \cdot v_m < P_m$$

e così di seguito.

Seguendo la manovra di estrazione in un diagramma in cui in ascissa sono riportate le velocità di sollevamento V ed in ordinata le masse M , l'operazione, alla velocità v_m , è rappresentata da una retta parallela all'asse delle ordinate (Fig. 32). Nel corso della manovra di sollevamento, solo in un istante può essere utilizzata l'intera potenza M_m ; tale istante corrisponde all'inizio della manovra, quando al gancio è applicato il peso corrispondente alla massa M_m . Man mano che aste o "lunghezze" vengono sollevate e staccate dal gancio, la potenza disponibile diventa sempre più esuberante.

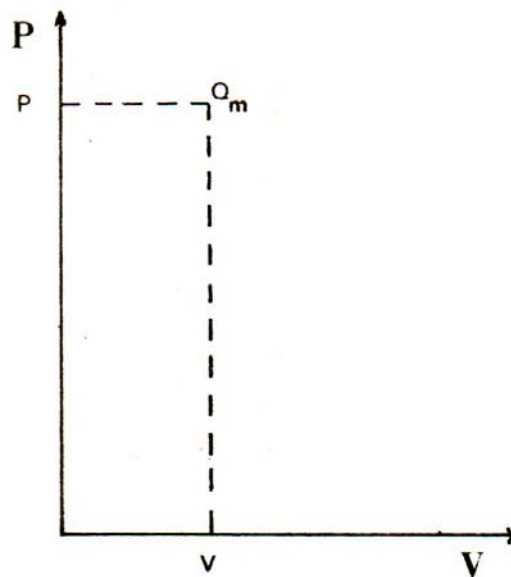


Figura 32 – Relazione velocità di sollevamento-peso sul gancio

La potenza installata ha un costo, non solo all'atto dell'acquisto, ma anche durante l'esercizio (maggiori oneri di trasporto, maggiori consumi, maggiori oneri di manutenzione); sarebbe, quindi, assurdo installare su un

⁴ Gli elementi in cui può essere suddivisa la colonna di aste durante una "manovra" sono denominati "lunghezze". Una lunghezza può essere costituita da una o più aste.

impianto una potenza che poi viene utilizzata interamente soltanto per tempi brevissimi.

In pratica si installa sempre una potenza $P < P_m$, per cui, alla profondità massima A, la velocità di sollevamento sarà v_n e non v_m . Vediamo allora quale sarà la curva $P(v)$ al gancio. Supponiamo di disporre di una potenza P ; poiché si desidera operare alle massime velocità compatibili con il peso al gancio e con la potenza disponibile, si dovrebbe disporre di un variatore continuo di velocità da inserire fra il motore ed il gancio e tale da permettere di realizzare, per ciascuna asta o "lunghezza" estratta, l'identità:

$$P = M \cdot v = \text{cost.} \quad (3.1)$$

Questa è l'equazione di un'iperbole equilatera (Fig.33). A meno di disporre di motori elettrici a corrente continua, negli altri casi si deve ricorrere all'inserimento, fra motore e gancio, di un cambio di velocità in modo da sostituire all'iperbole una spezzata (Fig. 33) che si avvicinerà tanto più all'iperbole quanto maggiore sarà il numero dei rapporti di velocità. Per ragioni di peso i cambi di velocità hanno, normalmente, un massimo di 8 rapporti.

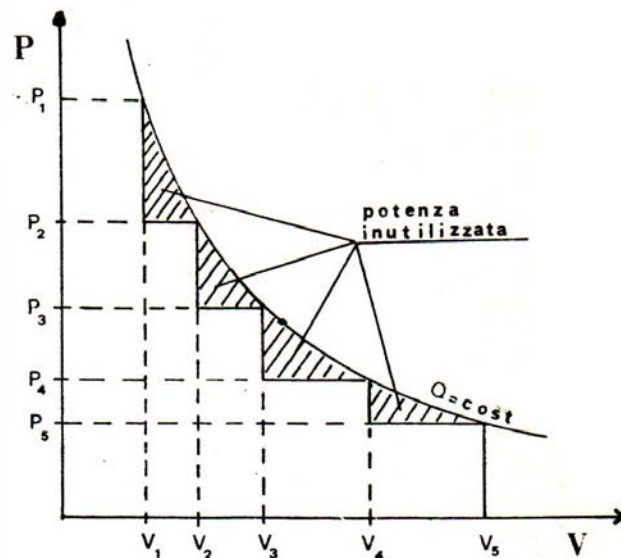


Figura 33 – Relazione velocità di sollevamento-potenza installata, con e senza cambio di velocità

L'inserimento del cambio di velocità dà luogo, nella manovra di sollevamento, ad una utilizzazione non completa della potenza disponibile, (nel diagramma di Fig 33, la potenza non utilizzata è rappresentata dai triangoli curvilinei tratteggiati) in quanto, con una determinata marcia, la potenza massima viene utilizzata soltanto per sollevare il peso massimo. Man mano che vengono tolte le aste, il peso al gancio diminuisce mentre la velocità di sollevamento resta quella corrispondente al rapporto innestato. Quando il peso al gancio avrà raggiunto il valore per il quale, con la potenza disponibile, è possibile il sollevamento con la velocità

immediatamente superiore, allora sarà possibile cambiare rapporto (operazione che avviene sempre ad argano fermo).

L'inserimento di un cambio di velocità fra argano e motore influenza anche i tempi di sollevamento della colonna di perforazione. Siano, infatti :

- t_n : il tempo di sollevamento dell'ennesima asta o "lunghezza";
- N : il numero di aste o di 'lunghezze' che costituiscono la colonna di perforazione;
- E : la lunghezza di ciascuna asta o di una "lunghezza";
- W_m .. il peso apparente per metro lineare della colonna di aste immersa nel liquido;
- K : il peso apparente delle aste pesanti immerse nel liquido;
- v_n : la velocità di sollevamento dell'ennesima asta o 'lunghezza',

si avrà :

$$t_n = \frac{E}{v_n} \quad (3.2)$$

Sostituendo nella (3.1) l'espressione di v_n ricavabile dalla (3.2) si ha :

$$\frac{1}{v_n} = \frac{NEW_m + K}{P} \quad \text{e} \quad t_n = \frac{NEW_m + K}{P} E \quad (3.3)$$

da cui

$$t_n = \frac{NE^2W_m}{P} + \frac{KE}{P}, \quad (3.4)$$

Se disponessimo di un variatore continuo di velocità inserito fra motore, e argano in modo da soddisfare la (3.1) e cioè la condizione $P = cost$, la funzione $t_n(N)$ sarebbe una retta avente coefficiente angolare $\frac{NE^2W_m}{P}$ ed intersezione con l'asse delle ordinate in corrispondenza del valore $\frac{KE}{P}$ (Fig. 34).

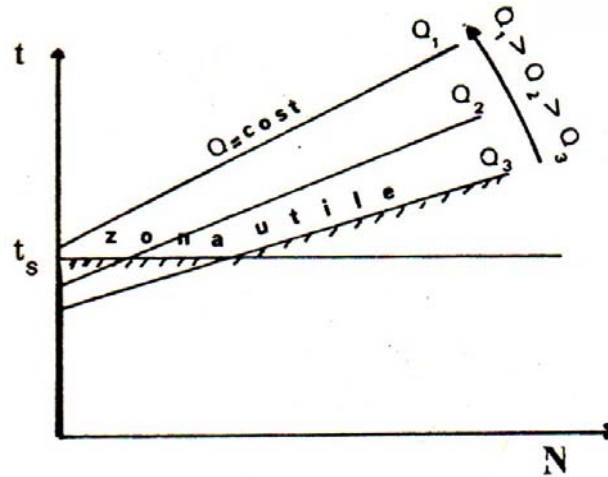


Figura 324 – Funzione tempo di sollevamento in funzione del numero di aste, con variatore continuo di velocità

Dalla (3.4) risulta che la pendenza della retta diminuisce con l'aumentare di Q , cioè decresce il tempo di sollevamento di ciascuna asta o "lunghezza". Esiste un tempo minimo t , di sollevamento e questo limite inferiore è dettato da ragioni di sicurezza; infatti il capo libero della corda non deve, prudenzialmente, superare una velocità di 15-20 m/sec, né la velocità di risalita o di discesa della colonna di perforazione deve eccedere determinati valori per non provocare nel foro pericolosi squilibri di pressione⁵.

Se si dispone di un cambio normale di velocità a diversi rapporti (soluzione questa molto diffusa), la curva $t_n(N)$ prende l'andamento di una spezzata (Fig. 35).

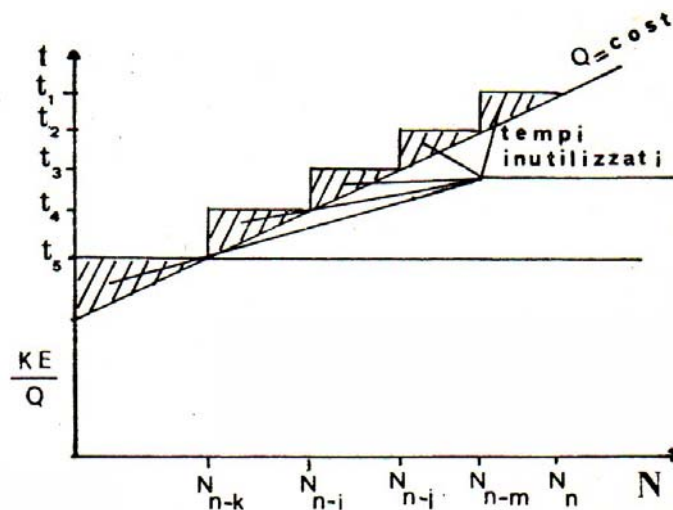


Figura 335 – Funzione tempo di sollevamento in funzione del numero di aste, con cambio normale di velocità

⁵ ccc

3.2.2 Influenza della potenza installata sui tempi di sollevamento

Vediamo in quale misura l'aumento di potenza installata produce una riduzione della durata della fase sollevamento.

Riprendendo la (3.2) e la (3.4), si può scrivere :

$$t_n = \frac{E}{v_n} = \frac{NEW_m + K}{P} E$$

Se disponessimo di un motore ideale o di un variatore continua di velocità, si avrebbe, per la (n-1)esima asta o "lunghezza" :

$$t_{n-1} = \frac{(N-1)EW_m + K}{P} E$$

e così via per le aste successive; pertanto

$$\sum t_n = \frac{E^2 W_m}{P} [N + (N-1) + \dots + 1] + \frac{KE}{P}$$

con $Q = \text{cost.}$

Ma, la serie fra parentesi quadra è uguale a $\frac{N}{2}(N+1)$, per cui

$$\sum t_n = \frac{NE^2 W_m (N-1) + 2KE}{2P}$$

Dato N, il numeratore di questa equazione è una costante, quindi :

$$\sum t_n = \frac{\text{cost.}}{P} \quad (3.5)$$

che è l'equazione di un'iperbole equilatera (Fig. 36).

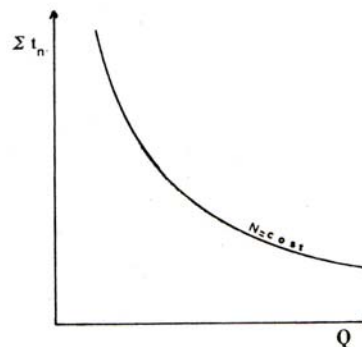


Figura 36 – Tempi di sollevamento in funzione della potenza

La (3.5) indica che, per incrementi costanti della potenza, le riduzioni nei tempi di sollevamento sono inizialmente sensibili ma diminuiscono progressivamente con l'aumentare del valore della potenza. Ciò significa che raggiunti certi valori della potenza installata sulla funzione sollevamento, apprezzabili riduzioni dei tempi di sollevamento si potrebbero ottenere soltanto con forti incrementi della potenza e, quindi, con costi difficilmente remunerati.

3.2.3 Regola pratica

Per la funzione sollevamento una regola pratica molto semplice, applicabile ad impianti di media e grande potenzialità che impieghino aste da 3"½-4"½, fornisce :

- potenza $P = 3$ CV ogni 10 metri di profondità;
- velocità iniziale $v = 0,5$ m/sec.

Per una profondità di 3.000 m la potenza per il sollevamento deve quindi essere di circa 1.000 CV. Infatti con aste da 4"½ il peso totale della colonna immersa in un normale fango si aggira sui 75.000 Kg e le aste pesanti possono raggiungere il peso di Kg 15.000, per cui, con una velocità iniziale di 0,5 m/sec si ha :

$$\frac{0,5 \times 90000}{75} = 600 \text{ CV}$$

se si ammette un rendimento globale di trasmissione di 0,6 si ottiene una potenza installata di circa 1.000 CV.

3.3 Funzione rotazione

3.3.1 Potenza motrice teorica

La funzione rotazione non si presta per una trattazione teorica. La potenza richiesta da questa funzione ha l'espressione :

$$P_r = C \cdot \omega$$

dove : C = coppia resistente in Kgm

ω = velocità angolare in rad/sec

Se è possibile conoscere con esattezza la velocità di rotazione, altrettanto non è possibile per la coppia C . Essa, infatti, dipende dal tipo di terreno che si attraversa, dal tipo di scalpello impiegato, dal peso sullo scalpello, dal diametro e dalla profondità del foro, ecc .

La potenza necessaria alla rotazione varia entro un campo molto ampio (da 20 a 500 CV).

3.3.2 Regola pratica

Una regola pratica suggerisce di determinare la potenza per la rotazione con la formula seguente :

$$P_r = \frac{L}{30} + 10 \text{ espressa in CV a } 100 \text{ giri/min}$$

dove L e la profondità del foro in metri.

3.3.3 Considerazioni generali

Dal punto di vista della conoscenza dei terreni che si attraversano, la velocità di rotazione della tavola rotary dovrebbe rimanere sempre costante qualunque sia la coppia resistente, in quanto la velocità di rotazione dello scalpello influenza la velocità di avanzamento. Per prevenire rotture della colonna di perforazione, dovrebbe essere sempre montato, sulla trasmissione del movimento, un limitatore di coppia.

3.4 Funzione circolazione

3.4.1 Descrizione del circuito del fluido di circolazione

Nel seguito si fa riferimento ad un liquido (fango od acqua) in quanto è il fluido più comunemente usato nella perforazione a rotazione. I principi generali che di seguito saranno esposti sono però validi anche per altri tipi di fluidi (aria, schiume).

Il liquido è tenuto in circolazione mediante una o più pompe, generalmente di tipo alternativo a semplice o doppio effetto, duplex, triplex o sestuplex e, più raramente, di tipo centrifugo.

In un ciclo di circolazione il liquido, lasciata la pompa, percorre il circuito di superficie (manifold) e, attraverso il tubo flessibile, raggiunge la testa di iniezione (Fig. 37), poi le aste e le aste pesanti, entro le quali è convogliato allo scalpello, dal quale fuoriesce attraverso uno o più fori di diametro variabile con il tipo e con il diametro dello scalpello stesso. Successivamente il liquido risale nell'intercapedine fra aste e pareti del foro e raggiunge la superficie, trasportando a giorno i detriti di perforazione. Questi vengono separati dal liquido o per decantazione in vasche (metodo impiegato normalmente negli impianti leggeri di piccola potenzialità) o per mezzo di vibrovagli. Attraverso canali di appropriate dimensioni il liquido raggiunge l'aspirazione delle pompe e viene da queste rimesso in ciclo.

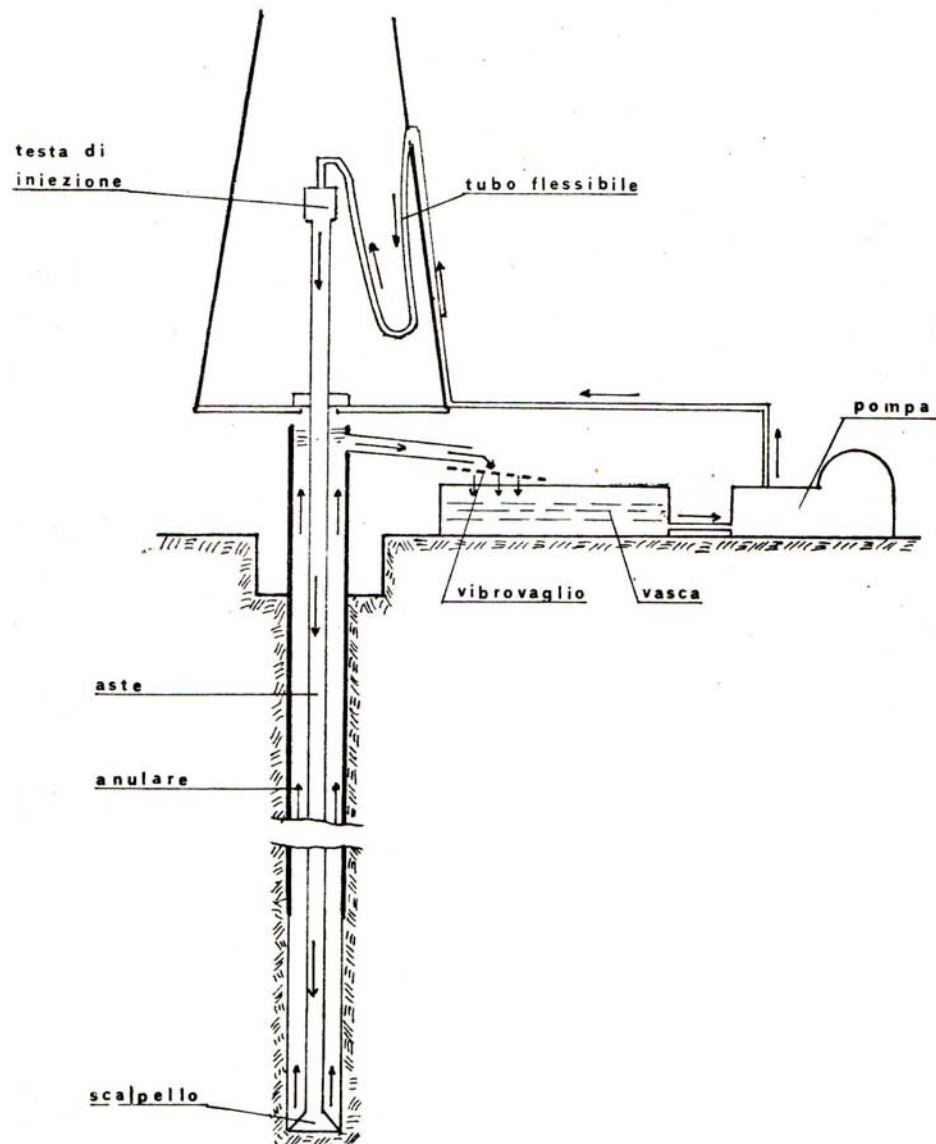


Figura 37 – Ciclo completo della circolazione del fluido

Durante la circolazione il liquido incontra una serie di resistenze al moto rappresentate da perdite di carico ripartite e concentrate.

Le perdite di carico che sono funzione della lunghezza del circuito sono di tipo ripartito, come le perdite di carico nelle aste, nelle aste pesanti, nell'intercapedine aste-foro, nelle tubazioni di superficie.

Sono di tipo concentrate le perdite di carico che si verificano in corrispondenza di saracinesche, degli ugelli dello scalpello, della testa di iniezione, dei giunti delle aste, etc.

Le perdite di carico totali dovute al circuito sono, quindi, date, per una portata costante, da un termine dovuto alle perdite di carico ripartite e da uno relativo a quelle concentrate.

3.4.2 Potenza per la funzione circolazione

La potenza idraulica che deve essere fornita ad un liquido perché esso possa circolare in un determinato circuito e data da:

$$P_i = \gamma_f \cdot H \cdot q = p \cdot q \quad \text{in W} \quad (3.6)$$

dove : γ_f = peso specifico del fango in N/m³

H = prevalenza in metri di acqua

q = portata in m³/sec

p = pressione in Kg/m³

La portata q è determinabile a priori : essa è, infatti, uno dei parametri fondamentali della perforazione a circolazione di liquido e viene stabilita in base alla velocità minima che deve avere il liquido stesso nello spazio anulare aste-foro per trasportare in superficie i detriti di perforazione. La pressione p è pure calcolabile, come si vedrà in seguito, in funzione delle caratteristiche geometriche del circuito, della portata e delle caratteristiche fisiche del liquido. La potenza che deve essere disponibile alla pompa è, quindi, determinata una volta noti questi elementi. Tale potenza dipende dal programma di perforazione (profondità da raggiungere, diametri degli scalpelli, tubaggi, etc.), dal tipo di aste impiegate, dal tipo di liquido, dal tipo di formazioni che si prevede di attraversare.

3.4.3 Regola pratica

Una regola pratica per stabilire, a titolo indicativo, la potenza idraulica da installare su un impianto, è data da :

$$P_i = 3-5 \text{ CV ogni } 10 \text{ metri di profondità del foro}$$

Questa regola è valida per impianti di media e grande potenzialità che impieghino aste da 4"½. Le potenze maggiori sono da adottare per diametri di perforazione superiori a 12"¼.

3.4.4 Potenza teorica richiesta dalla funzione circolazione

Con l'approfondimento del foro la pressione necessaria per mantenere in circolazione una portata q_i di fluido cresce pressappoco linearmente in funzione della profondità (Fig. 38). Il segmento OK rappresenta le perdite di carico costanti dovute al circuito di superficie, alle aste pesanti ed allo scalpello. Poiché la velocità di avanzamento dipende anche dalla funzione circolazione, sarà indispensabile utilizzare al massimo la potenza disponibile per questa funzione. Cioè, come per le altre funzioni, si dovrebbe cercare di realizzare sempre la condizione :

$$P_i = p \cdot q = \text{cost}$$

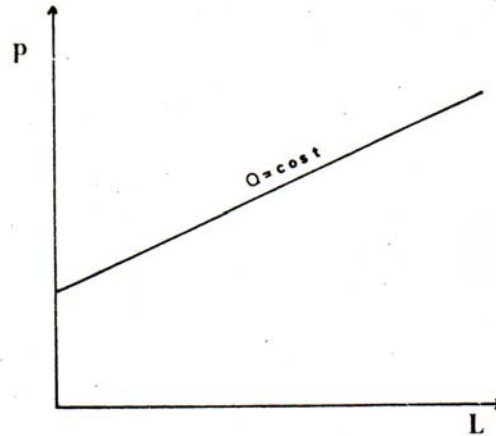


Figura 348 – Pressione in funzione della profondità

Per una pompa alternativa si avrebbero teoricamente due possibilità :

- a velocità costante della pompa, variare progressivamente il diametro delle camicie, ma questo comporta difficoltà insormontabili; è, invece, possibile variare saltuariamente il diametro delle camicie e dei pistoni;
- a diametro costante delle camicie, variare la velocità dei pistoni, ma in questo caso, se da un lato si potrebbe realizzare una portata variabile, dall'altro si potrebbe sottoporre la pompa a sforzi superiori a quelli per i quali è stata progettata e costruita.

Come vedremo meglio in un altro capitolo, le perdite di carico sono, a parità di caratteristiche del circuito, una funzione parabolica della portata q (Fig. 39).

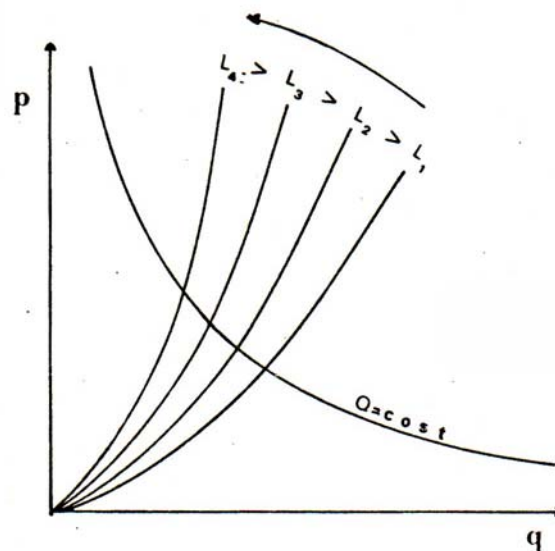


Figura 39 – Perdite di carico in funzione della portata

Per profondità crescenti le curve paraboliche che rappresentano le perdite di carico si spostano verso l'asse delle ordinate. L'ideale sarebbe il poter far spostare il punto caratteristico del circuito lungo l'iperbole, al variare della portata. In pratica questo, come si è detto, è impossibile, per cui si ricorre al cambio di diametro delle camicie e dei pistoncini. Le case avvengono come nel caso della funzione sollevamento quando si inserisce un cambio di velocità. Con riferimento alla Fig. 40, se supponiamo di disporre di un certo diametro delle camicie e se, nell'ipotesi di un numero costante di colpi della pompa, ammettiamo che, con diametro D_1 delle camicie, sia possibile una portata q_1 fino alla pressione p_1 (cioè fino all'intersezione del ramo di parabola corrispondente alla profondità L_1 con l'iperbole $Q = \text{cost}$), al crescere della profondità, non potendo seguire l'iperbole, sarà necessario ridurre il diametro delle camicie in quanto la pressione p va aumentando con la profondità. Il nuovo diametro D_2 delle camicie consentirà, sempre con lo stesso numero di colpi della pompa, una portata q_2 , minore della precedente, con la quale si avranno minori perdite di carico per cui la pressione sarà p_2 minore di p_1 e la potenza assorbita sarà $Q_2 = p_2 \cdot q_2$ minore della potenza disponibile $Q = p_1 \cdot q_1$. Ne deriva, quindi, che il cambio delle camicie comporta la non utilizzazione della piena potenza disponibile. Man mano che la profondità aumenta, cresce la pressione p , ferma restando la portata q_2 . Ciò si verificherà finché la pressione p avrà raggiunto il valore p_2 per il quale è impegnata tutta la potenza disponibile $Q = p_2 \cdot q_2 = p_1 \cdot q_1$. A questo punto dovrà essere nuovamente ridotto il diametro delle camicie e così via.

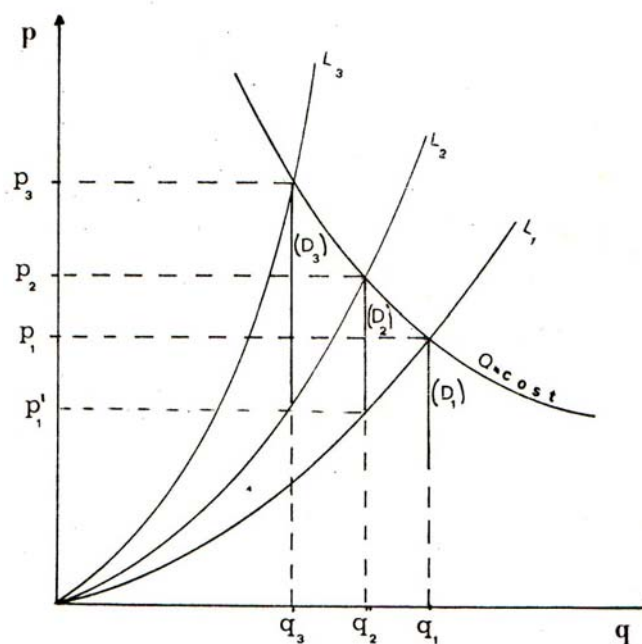


Figura 40 – Scelta del diametro delle camicie, in funzione della portata e della pressione

La riduzione del diametro delle camicie della pompa comporta, come già detto, una riduzione della portata, per cui il per mantenere una velocità di risalita dei detriti in superficie, sarà necessario ridurre il diametro di perforazione. Ciò si realizza cambiando diametro dello scalpello e

rivestendo con tubazione metallica il tratto di foro perforato precedentemente con diametro maggiore.

Dalla espressione $Q = p \cdot q$ si deduce anche che, in un impianto di perforazione a circolazione diretta, non è conveniente l'impiego di pompe centrifughe. Queste, infatti, hanno una curva caratteristica per cui, al disotto di certe pressioni, la portata prima si riduce rapidamente, e poi si annulla al crescere della pressione. Occorrerebbe avere, quindi, a disposizione una serie di pompe centrifughe di caratteristiche diverse, ma ciò urta contro esigenze economiche e tecniche. E' questa la ragione sostanziale per la quale, nella massima parte degli impianti di perforazione a circolazione diretta di fluido, vengono installate pompe alternative che consentono una facile variazione della portata e della pressione, anche se a scapito della completa utilizzazione della potenza.

Negli impianti rotary a circolazione inversa sono, invece, montate pompe centrifughe senza distributore. Le ragioni sono le seguenti : .

- negli impianti di questo tipo i detriti di perforazione (che possono raggiungere le dimensioni di 15-20 cm) sono portati a giorno all'interno delle aste e quindi debbono passare attraverso la pompa. Pertanto non possono essere impiegate pompe alternative a causa della presenza delle valvole. Si impiegano, invece, pompe centrifughe senza distributore (pompe ad elica);
- la pompa lavora esclusivamente in aspirazione con una altezza massima di 5-6 m, limitata dalle perdite di carico nel circuito di aspirazione e dal peso specifico del liquido contenente i detriti. Per questa ragione la asta di trascinamento usata in questi impianti ha una lunghezza non superiore a 4-5 metri. Poiché la pompa lavora solo in aspirazione, la prevalenza massima è nota e non elevata, per cui è possibile l'impiego di una pompa centrifuga.

In molti casi, per aumentare l'altezza di aspirazione, si ricorre all'impiego di un iniettore idraulico (azionato da apposita pompa centrifuga), mediante il quale viene iniettata acqua alla base dell'asta di trascinamento.

4 La perforazione a roto-percussione

4.1 Introduzione

La perforazione a roto-percussione è il classico sistema per la realizzazione di fori da mina, e la sua apparsa cronologica coincide con lo sviluppo industriale del XIX secolo. Il primo prototipo si fa risalire a Singer (1838) e a Couch (1848) ed erano mossi da macchine a vapore, ma fu solamente quando l'aria compressa venne utilizzata come sorgente di energia, nel corso dello scavo del tunnel del Moncenisio, che il sistema vide la sua evoluzione ed il suo uso intensivo. Questo evento, assieme all'arrivo della dinamite, fu decisivo per il rapido sviluppo dell'abbattimento delle rocce nell'ingegneria civile e mineraria alla fine del XIX secolo.

Il principio di perforazione di questi impianti si basa sull'impatto di una massa di acciaio (martello) su di un utensile che trasmette nello stesso tempo l'energia al fondo del foro ad un elemento finale chiamato scalpello. Gli impianti di perforazione a roto-percussione sono classificati in due gruppi, in funzione della posizione del martello:

- *Top hammer* (martello in superficie). In questi sistemi due delle azioni basilari, rotazione e percussione, sono prodotte all'esterno del foro, a sono trasmesse per mezzo di una batteria di aste allo scalpello.
- *Down the hole hammer* (martello fondo foro). La percussione avviene direttamente sullo scalpello, mentre la rotazione si realizza all'esterno. Il pistone è comandato pneumaticamente, mentre la rotazione può essere pneumatica o idraulica

A seconda del campo di applicazione degli impianti, in superficie o in sotterraneo, le diametrie più comuni sono riportate nella seguente tabella.

Metodi di perforazione	Diametro di perforazione (mm)	
	Superficie	Sotterraneo
Top hammer	50-127	38-65
Down the hole	75-200	100-165

I principali vantaggi della perforazione a roto-percussione sono:

- può essere impiegata su ogni tipo di roccia;
- ampia gamma di diametri;
- impianto versatile, si adatta bene a differenti operazioni ed è estremamente mobile;

- richiede un solo operatore;
- manutenzione semplice e veloce;
- il costo di investimento non è elevato.

A seguito di questi vantaggi e caratteristiche è sovente impiegato nei seguenti settori:

- ingegneria civile: tunnels, impianti idraulici sotterranei, strade, autostrade, scavi industriali, ecc.
- ingegneria mineraria: operazioni di superficie di piccola o media taglia, volate, ecc.

4.2 Fondamentali della perforazione a roto-percussione

La perforazione a roto-percussione si basa sulla combinazione dei seguenti meccanismi (Fig. 41):

- *Percussione.* L'impatto ripetitivo prodotto dal pistone genera delle onde di compressione che sono trasmesse allo scalpello attraverso le aste (nel caso di martello in superficie) o direttamente sullo stesso (nel caso di martello fondo foro).
- *Rotazione.* Con questo movimento, lo scalpello è ruotato così da cambiare la posizione di impatto.
- *Carico di spinta.* Per mantenere il contatto dello scalpello con la roccia viene applicato un carico alla batteria di perforazione.
- *Rimozione dei detriti.* La rimozione dei detriti avviene attraverso il soffiaggio di aria addizionata di acqua al fondo del foro.

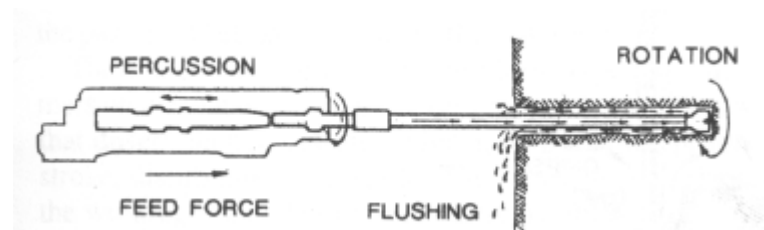


Figura 41 – Azione di base nella perforazione a roto-percussione

Il processo di *indentazione* con il quale si ottiene la penetrazione è suddiviso in cinque fasi come indicato in fig.33:

- a) Frantumazione della roccia sul contatto con lo scalpello.
- b) Appaiono delle fratture radiali dai punti di concentrazione degli sforzi e un si forma un cuneo a forma di V.
- c) La roccia del cuneo è polverizzata.

- d) I frammenti più grandi sono ottenuti nelle zone vicine al cuneo.
- e) I detriti di perforazione sono allontanati.

La sequenza si ripete con lo stesso ritmo degli impatti. Il prodotto di questo processo aumenta proporzionalmente con la dimensione delle schegge di roccia.

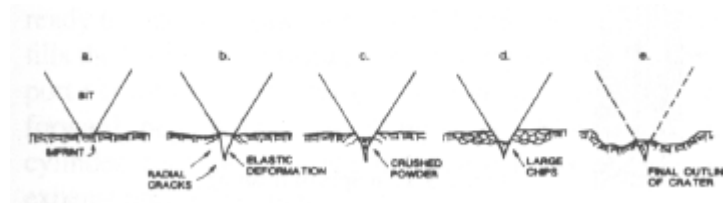


Figura 42 – Sequenza della rottura della roccia durante il centramento della formazione

4.2.1 Percussione

L'energia cinetica E_c del pistone è trasmessa dal martello allo scalpello, attraverso le aste, nella forma di onda di compressione. L'onda viaggia ad alta velocità e la sua forma dipende principalmente dal disegno del pistone.

Quando l'onda raggiunge lo scalpello, una parte dell'energia è trasformata in lavoro, causando la penetrazione dello scalpello, e il resto è riflesso e torna attraverso le aste. L'efficienza di trasmissione è di difficile valutazione e dipende da molti fattori tra i quali: tipo di roccia, forma e dimensione del pistone, caratteristiche delle aste, disegno dello scalpello, ecc. Un'altra cosa da tener presente è l'energia persa attraverso i filetti degli accoppiamenti delle singole aste, a cause della riflessione e dell'attrito che è convertita in calore ed usura sui filetti delle aste. Nel primo accoppiamento le perdite oscillano tra l'8 ed il 10% dell'energia dell'onda.

In questi sistemi di perforazione, la forza di percussione è il parametro che maggiormente influenza la velocità di avanzamento.

L'energia liberata ad ogni colpo del martello può essere stimata con le seguenti equazioni:

$$E_c = \frac{1}{2} m_p \times v_p^2$$

$$E_c = p_m \times A_p \times l_p$$

dove: m_p = massa del pistone

v_p = velocità massima del pistone

p_m = pressione del fluido di lavoro all'interno del cilindro

A_p = area superficiale frontale del pistone

l_p = corsa del pistone

Nella maggior parte dei martelli idraulici, i fabbricanti indicano il valore dell'energia di impatto, ma non lo forniscono nel caso dei martelli pneumatici. Per questi, particolare attenzione dovrebbe essere presa nella stima di p_m , essendo questa dal 30 al 40 % più bassa nel cilindro che nel compressore, comportando le perdite di pressione in fase di caricamento e di espansione dell'aria, ad ogni colpo di pistone.

Così, la potenza del martello è pari all'energia del colpo moltiplicata per la frequenza dei colpi n_g :

$$P_M = E_c \times n_g \quad \text{dove } n_g = K \times \left(\frac{p_m \times A_p}{m_p \times l_p} \right)^{\frac{1}{2}}$$

e tenendo conto delle equazioni precedenti possiamo scrivere:

$$P_M = k \times \frac{(p_m \times A_p)^{3/2} \times l_p^{1/2}}{m_p^{1/2}}$$

Il meccanismo di percussione consuma dall'80 all'85 % della potenza totale dell'attrezzatura.

4.2.2 Rotazione

La rotazione, che gira lo scalpello tra un colpo ed il consecutivo, ha la funzione di far battere lo scalpello in punti diversi della roccia sul fondo del foro.

Per ogni tipo di roccia esiste una velocità ottimale di rotazione che produce tagli di dimensione maggiore, beneficiando dell'area libera del foro creata ad ogni impatto.

Quando si perfora con uno scalpello del tipo ad *inserti*, la velocità di rotazione oscilla tra 80 e 150 giri al minuto con angoli di rotazione di 10-20 gradi. Per scalpelli del tipo a *bottoni* da 51 a 89 mm, le velocità dovrebbero essere più basse, tra i 40 ed i 60 r.p.m., che porta ad angoli di rotazione tra 5 e 7 gradi. Scalpelli con diametri maggiori richiedono velocità ancora più basse.

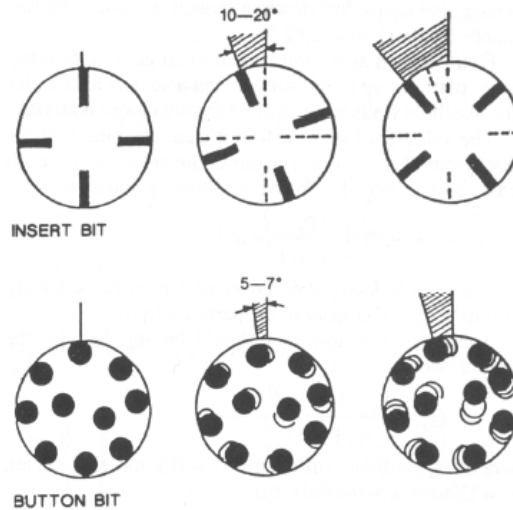


Figura 43 – Velocità di rotazione tra colpi consecutivi come funzione della velocità di avanzamento e del diametro dello scalpello

4.2.3 Carico di spinta

L'energia generata dal meccanismo dei colpi di martello dovrebbe essere trasmessa alla roccia, per cui è necessario mantenere lo scalpello in contatto permanente con il fondo del foro. Questo è ottenuto con il carico di spinta, provvisto di un motore di spinta, che andrebbe adattato al tipo di roccia e i scalpello.

In caso di spinta insufficiente si hanno i seguenti effetti negativi: basse velocità di avanzamento, maggiore usura delle aste e dei manicotti, allentamento delle filettature d'acciaio e riscaldamento delle stesse.

Al contrario, se la spinta verso il basso è eccessiva, la velocità di avanzamento viene comunque diminuita, c'è maggiore resistenza alla rotazione, le filettature possono incepparsi, l'usura sullo scalpello cresce come anche la velocità di rotazione e le vibrazioni delle attrezzature, ed il foro può essere deviato.

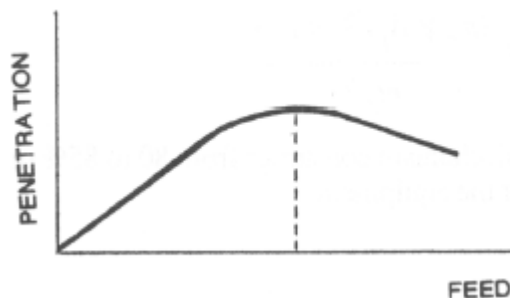


Figura 44 – L'effetto della spinta del carico sulla velocità di avanzamento in superficie nella perforazione a roto-percussione

Come succede con la rotazione, questo parametro non ha un peso decisivo sulle velocità di avanzamento.

4.2.4 Rimozione dei detriti

Per avere una perforazione efficiente il fondo dei fori deve essere mantenuto pulito, eliminando i frammenti di roccia non appena questi vengono prodotti. Se ciò non viene fatto, una grande quantità di energia viene dissipata nella ri-rottura degli stessi frammenti, con la conseguente usura degli scalpelli e diminuzione della velocità di avanzamento, oltre al rischio di bloccaggio (inceppamento, incastro,...).

La pulizia del foro è condotta con un flusso di aria, acqua o schiuma che è iniettata in pressione al fondo, attraverso delle aperture sullo scalpello.

I detriti sono portati verso l'alto attraverso lo spazio tra le aste e le pareti del foro.

La pulizia del foro con aria è utilizzata in operazioni superficiali, dove la polvere prodotta può essere eliminata per mezzo di collettori.

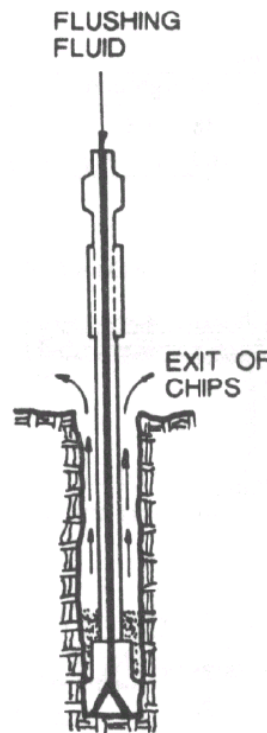


Figura 45 – Principio della circolazione

La pulizia del foro con acqua è maggiormente usata per la perforazione sotterranea, essa mantiene anche bassa la polvere, nonostante una riduzione del 10 – 20 % circa delle prestazioni.

La schiuma è usata come complemento all'aria, aiutando a portare in superficie le particelle più grandi ed agendo anche da isolante per le pareti del foro quando si perfora in materiali sciolti.

La velocità dell'aria, per avere un'efficiente pulizia, va da 15 a 30 m/s. Le velocità minime per ciascun caso possono essere calcolate dalla seguente equazione:

$$v_a = 9.55 \times \frac{\rho_r}{\rho_r + 1} \times d_p^{0.6}$$

dove: v_a = velocità del flusso d'aria [m/s]

ρ_r = densità della roccia [g/cm³]

d_p = diametro delle particelle [mm]

Quindi, la portata che dovrebbe essere fornita dal compressore è:

$$Q_a = \frac{v_a \times (D^2 - d^2)}{1.27}$$

dove: Q_a = portata [m³/min]

D = diametro del foro [m]

d = diametro delle aste [m]

Quando per l'asportazione dei detriti è utilizzata l'acqua, la velocità dell'aria dovrebbe essere compresa tra 0.4 e 1 m/s. In questi casi le pressioni sono mantenute tra 0.7 e 1 MPa, per evitare al flusso di entrare nel martello.

Quando si utilizza aria con martelli in superficie, non è comune avere un compressore ad alta pressione solo per il flusso d'aria.

Soltanto in perforazioni con martelli in foro si impiega un compressore ad alta pressione (1 – 7 MPa), perché la potenza di percussione è accresciuta al passaggio dei detriti.

Un importante fattore da ricordare quando si stima il flusso per l'asportazione dei detriti è quello delle perdite di carico dovute alle strettoie attraverso cui il fluido è costretto a passare e lungo la stringa di perforazione.

4.3 Perforazione con Martello in Superficie

Questo sistema di perforazione può essere qualificato come il più convenzionale o classico, e sebbene il suo uso con trasmissione pneumatica era limitato dall'attrezzatura in foro e da quella per la rotazione, la comparsa dei martelli idraulici negli anni 60 ha dato una nuova spinta a questo metodo, completando ed allargando il suo campo di applicazione.

4.3.1 Impianto di perforazione pneumatico

I martelli azionati da aria compressa consistono di:

- Un cilindro con un coperchio frontale che ha un'apertura assiale dove va il mandrino di rotazione, ed anche un dispositivo di sostegno per le aste di perforazione.
- Il pistone che alternativamente batte sul gambo d'acciaio, attraverso il quale l'onda d'urto è trasmessa all'asta.
- La valvola che regola il passaggio di aria compressa in un volume prefissato nella parte anteriore e posteriore del pistone.
- Un meccanismo di rotazione, che può essere una barra di rotazione scanalata a spirale o a rotazione indipendente.
- Un sistema per il passaggio del fluido di perforazione che consiste in un tubo per il passaggio dell'aria all'interno dello scalpello.

Questi elementi sono comuni a tutti i tipi di martelli presenti sul mercato, con poche caratteristiche di progetto che differiscono: diametro del cilindro, lunghezza della corsa del pistone, valvole di distribuzione, etc.

Le lunghezze di perforazione raggiunte con questo sistema solitamente non vanno oltre i 30 metri, poiché comportano importanti perdite di carico nella trasmissione dell'onda d'urto e deviazioni del foro.

Come detto prima, la rotazione delle aste può essere ottenuta in due differenti modi:

1. con una barra di rotazione con scanalature a spirale o anello dentato, e
2. con un motore indipendente.

Il primo gruppo è comune negli impianti di perforazione leggeri, mentre il secondo è utilizzato per fori di grande diametro dove è necessaria una prestazione maggiore.

Nella rotazione con barra spiralata, il pistone ha una forma tubolare e circonda la barra per mezzo di un dado. La barra è collegata alla parte statica del martello con dei fermi. La parte frontale del pistone ha scanalature che si accoppiano con quelle del mandrino. Questo fa ruotare il pistone, nella sua corsa di ritorno, nella stessa direzione delle aste. Le barre di rotazione hanno diversi passi, così ogni 30, 40 o 50 corse si ottiene un giro completo.

Nella rotazione con anello dentato, la parte frontale del pistone ha scanalature che corrispondono esattamente al mandrino, il quale è internamente collegato con l'anello dentato. Anche in questo caso, la batteria ruota solo durante la corsa di ritorno del pistone.

La seconda procedura, che è quella più usata, ha un motore separato, montato esternamente al martello pneumatico o idraulico. I suoi vantaggi sono:

- con un pistone della stessa dimensione il martello riceve più energia, perché quando la barra di rotazione viene eliminata la superficie di lavoro del pistone su cui agisce l'aria compressa aumenta.
- Maggiore potenza che consente di lavorare con diametri e lunghezze maggiori.
- La percussione e la rotazione possono essere adattate al tipo di roccia da perforare.
- Maggior rendimento di perforazione.

Questo tipo di macchine hanno un sistema di ingranaggi cilindrico per trasmettere la rotazione alle aste.

Il campo di applicazione dei martelli per perforazione di roccia posti in superficie sta volgendo sempre più verso fori poco profondi con lunghezze comprese tra 3 e 15 metri, fori di piccolo diametro, da 50 a 100 mm, rocce dure e aree di difficile accesso. Questo è dovuto al grande uso di aria compressa, circa $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$ per ogni centimetro di diametro, ed al grande logorio degli accessori, aste di perforazione, manicotti, scalpelli, etc., alla frequenza dei soffi e alla forma delle onde d'urto trasmesse con pistoni di largo diametro.

Comunque, le trivelle pneumatiche ancora danno numerosi vantaggi:

- Semplicità
- Affidabilità e bassa manutenzione
- Facile riparazione
- Bassi costi capitali
- Possibilità di usare le esistenti installazioni di aria compressa per operazioni nel sottosuolo.

4.3.2 Impianto di perforazione idraulico

Alla fine degli anni sessanta e inizio degli anni settanta un grande sviluppo tecnologico ha interessato il campo della perforazione, con lo sviluppo dei martelli idraulici.

Un impianto di perforazione idraulico è composto essenzialmente dagli stessi elementi che compongono un impianto pneumatico.

La differenza più importante tra i due sistemi è che invece di utilizzare aria compressa come mezzo di trasmissione dell'energia, si utilizza un

mezzo più efficiente, olio idraulico, che è pompato nel circuito da pompe ad ingranaggi o a pistone, guidato da un motore diesel o da un gruppo trasformatore elettrico.

Sebbene inizialmente questi perforatori erano usati soprattutto per operazioni sotterranee, nel tempo sono cominciati ad apparire nella perforazione di superficie, a complemento dei sistemi idraulici.

In funzione della potenza erogata dall'impianto di perforazione si può scegliere il diametro delle aste.

Le ragioni per cui la perforazione idraulica è tecnologicamente migliore di quella pneumatica sono le seguenti:

- *Maggiore efficienza energetica.* I sistemi di perforazione idraulici lavorano con fluidi a pressioni molto maggiori di quelli pneumatici ed inoltre la caduta di pressione è piccola.
- *Minori costi accessori di perforazione.* Negli impianti idraulici la trasmissione di energia è effettuata per mezzo di pistoni che sono di lunghezza maggiore e diametro inferiore dei pistoni usati in quelli pneumatici. Lo sforzo delle aste dipende dalla loro sezione e dalla dimensione del pistone, infatti la forma dell'onda d'urto è più chiara ed uniforme nei sistemi idraulici che negli altri, dove i livelli di sforzo sono molto alti, producendo sforzo dell'asta ed una serie di onde secondarie a bassa energia. In pratica è stato provato che la vita delle aste, nei sistemi idraulici, è più lunga del 20 %.
- *Maggiore capacità di perforazione.* A causa della migliore trasmissione di energia e della forma dell'onda, la velocità di avanzamento dei sistemi idraulici è dal 50 al 100 % maggiore di quella dei sistemi pneumatici.
- *Migliori condizioni ambientali.* I livelli di rumore sono sensibilmente più bassi negli impianti idraulici che in quelli pneumatici, grazie alla mancanza di fuga d'aria. Questo succede soprattutto nei campi a bassa frequenza, dove le cuffie di protezione delle orecchie sono meno efficienti.
- Oltre a questo, nelle operazioni sotterranee non si produce la nuvola di acqua ed olio, migliorando l'atmosfera e la visibilità dell'operatore. D'altro canto, la spinta idraulica consente un progettazione più ergonomica delle attrezzature, rendendo sia le condizioni generali di lavoro che la sicurezza più favorevoli.
- *Maggiore flessibilità operativa.* La pressione che aziona il sistema nello scalpello può essere variata, come anche l'energia del colpo e la frequenza di percussione.
- *Maggiore facilità nell'automatizzazione.* Queste attrezzature (idrauliche) sono più facilmente adattabili per le operazioni di automatizzazione, così come il cambio di aste, i meccanismi anti-bloccaggio, etc...

D'altra parte, i problemi che sorgono sono:

- Maggiore investimento iniziale.
- Riparazioni più complesse e costose rispetto ai sistemi pneumatici, che richiedono una migliore organizzazione e preparazione del personale addetto alla manutenzione.

4.4 Perforazione con Martello a Fondo Foro

Questi tipi di trivelle furono sviluppati nel 1951 da Stenuick, e da allora sono stati largamente utilizzati in operazioni di superficie, con rocce di media durezza e diametri da 105 a 200 mm, sebbene esistano modelli che raggiungono i 915 mm di diametro.

L'estensione di questi strumenti alle operazioni sotterranee è abbastanza recente, ed infatti sono diventati popolari in questo settore dal 1975 con il nuovo *Long Blasthole* ed i metodi *Inverted Craters*.

Al giorno d'oggi, in operazioni di superficie questo metodo è indicato per rocce dure e diametri sopra i 150 mm, in competizione con la perforazione a rotazione, dovuto al forte sviluppo delle attrezzature dei martelli idraulici in superficie.

Il funzionamento di un martello a fondo foro è basato sul fatto che il pistone cede tutta l'energia direttamente allo scalpello. Il fluido motore è aria compressa, fornita attraverso un tubo che serve da supporto e fa girare il martello. La rotazione è realizzata per mezzo di un semplice motore pneumatico o idraulico, montato in superficie, come anche il motore per l'alimentazione.

La pulizia del foro è realizzata con l'aria di scarico del martello attraverso i fori dello scalpello.

La frequenza dei colpi per martelli a fondo foro è solitamente compresa tra 600 e 1600 colpi al minuto.

Lo schema dei martelli a fondo foro di oggi è più semplice degli originali, i quali avevano una valvola a farfalla incorporata, che serviva ad indirizzare alternativamente l'aria nella parte alta del pistone. I martelli senza valvola operano con nervature o sporgenze dello stesso pistone, permettendo un aumento della frequenza dei colpi, ed abbassando il consumo di aria.

Per evitare l'ingresso di acqua, per l'effetto della pressione idraulica, i martelli possono essere dotati di valvole di non ritorno installate nella sezione di ingresso dell'aria.

Il rapporto corsa/diametro del pistone per martelli in superficie è minore o uguale a 1, ma per martelli a fondo foro, poiché le dimensioni del pistone sono limitate dal diametro del foro, al fine di ottenere energia sufficiente ad ogni colpo, tale rapporto va da 1.6 a 2.5 per piccoli diametri, e si avvicina di più ad 1 per diametri grandi.

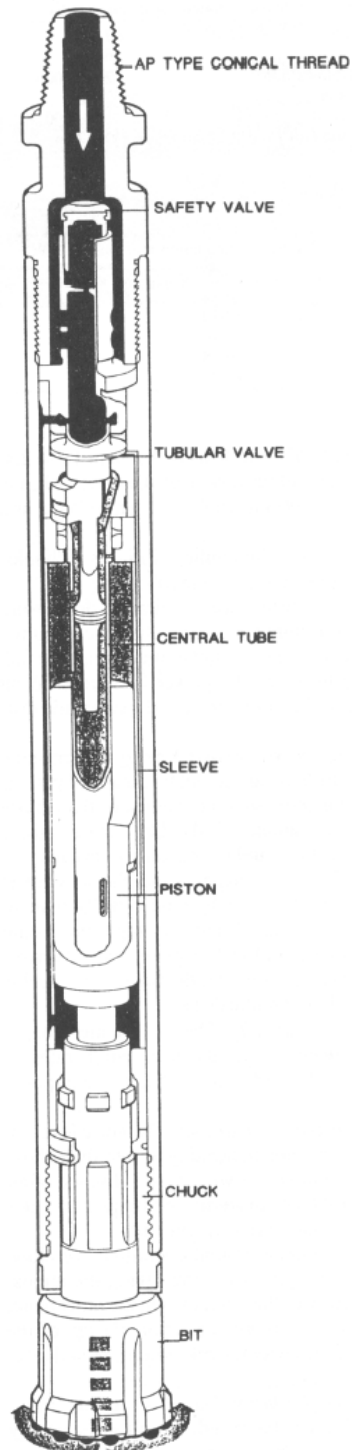


Figura 46 – Tipico martello a fondo foro

Se si analizza l'equazione della potenza erogata da un impianto di perforazione a roto-percussione:

$$P_M = \frac{p_m^{1.5} \times A_p^{1.5} \times l_p^{1.5}}{m_p^{0.5}}$$

dove: p_m = pressione dell'aria che agisce sul pistone

A_p = area effettiva del pistone

l_p = corsa del pistone

m_p = massa del pistone

Si può vedere che la pressione dell'aria è il parametro che più influenza la velocità di perforazione con un martello a fondo foro.

Al giorno d'oggi esistono impianti senza valvola che operano ad alte pressioni, da 2 a 2.5 MPa, con ottimi rendimenti.

Per evitare la percussione a vuoto, i martelli solitamente hanno un sistema di protezione che chiude l'apporto di aria al cilindro quando lo scalpello non è a contatto con la roccia a fondo foro.

Gli scalpelli sono collegati al martello attraverso due sistemi: nel primo, come una baionetta, lo scalpello è inserito nel martello e ruotato, di solito a sinistra, in modo da bloccarlo; nel secondo si usano elementi di ritenuta come i semi-anelli.

Quando si perfora una formazione rocciosa che contiene acqua, dovrebbe essere disponibile un compressore con sufficiente aria compressa per espellere l'acqua quando necessario. Se non è disponibile, il peso della colonna d'acqua ridurrà le prestazioni.

Per quanto riguarda la forza verso il basso che dovrebbe essere applicata per mantenere lo scalpello a contatto con la roccia, una buona regola empirica è avvicinarsi a 85 kg per ogni centimetro di diametro. Una spinta eccessiva non aumenterà la velocità di avanzamento; accelererà l'usura dello scalpello e caricherà in eccesso il sistema di rotazione.

Quando si perfora ad alta pressione, all'inizio serve un'aggiuntiva lubrificazione forzata per vincere l'effetto di opposizione dell'aria a fondo foro. Il contrario succede quando c'è una grande profondità ed il numero dei tubi tale che superano il peso raccomandato. In questo caso l'operatore deve controllare la ritenzione (???) e la rotazione per mantenere la spinta ottimale sullo scalpello.

Le velocità di rotazione raccomandate in funzione del tipo di roccia sono riportate nella seguente tabella:

Tipo di roccia	Velocità di rotazione (giri/min)
Molto tenera	40 - 60
Tenera	30 - 50
Media	20 - 40
Dura	10 - 30

Una buona norma è regolare la velocità di rotazione con quella di avanzamento, con la seguente equazione:

$$\text{Velocità di rotazione (giri/min)} = 1.66 \text{ Velocità di perforazione (m/h)}$$

Oltre l'aria, come fluido per la pulizia del foro si può utilizzare acqua, come anche iniettare schiuma. Quest'ultima ha diversi vantaggi perché dà buoni risultati in diametri grandi, con aria insufficiente, con bassa velocità di risalita (fino a 0.77 m/s), e contribuisce alla stabilità delle pareti in formazioni tenere. Questo metodo è particolarmente indicato per perforazioni di pozzi d'acqua in terreni non consolidati.

Diametro di perforazione (mm)	Diametro tubaggi (mm)
102 – 115	76
127 – 140	102
152 – 165	114
200	152

I vantaggi della perforazione a fondo foro, rispetto agli altri sistemi, sono:

- La velocità di perforazione resta praticamente costante man mano che la profondità cresce.
- C'è meno usura sullo scalpello rispetto ai martelli di superficie, grazie all'aria per la rimozione dei detriti, che passa direttamente attraverso lo scalpello, che pulisce in modo efficace il fondo e risale nello spazio anulare tra tubi e pareti del foro.
- Vita più lunga del tubo, rispetto a quella di aste e manicotti.
- Piccolissima deviazione del foro, ideale per perforare lunghi tratti.
- La bassa energia per impatto e l'alta frequenza dei colpi favoriscono il suo uso in formazioni non compatte o con stratificazione sfavorevole.
- E' richiesta una minore coppia di rotazione rispetto agli altri metodi di perforazione.

- Non sono necessarie barre di caricamento e con piccoli impianti è possibile perforare fori di largo diametro a grandi profondità.
- Il costo per metro lineare per pozzi con grande diametro ed in rocce dure è più basso di quello nella perforazione a rotazione.
- Il consumo di aria è più basso di quello dei martelli pneumatici in superficie.
- Il livello di rumore nell'area di lavoro è più basso, essendo il martello all'interno del foro.

D'altra parte, i problemi sono:

- Bassa velocità di avanzamento.
- Ogni martello è disegnato per uno stretto intervallo di diametri, che varia ogni 12 mm.
- Il diametro più piccolo è limitato dalla dimensione del martello con un rendimento accettabile, che attualmente è di circa 76 mm.
- Esiste il rischio di perdere il martello dentro il foro, a causa di ostruzioni e distacchi dello stesso.
- Sono richiesti compressori ad alta pressione, con gran consumo di energia.

Attualmente, la perforazione con martello in foro nell'intervallo 76 – 125 mm è sostituita dalla perforazione con martello pneumatico posto in superficie. Nella tabella che segue sono riportate le caratteristiche tecniche per alcuni martelli a fondo foro:

Diametro di perforazione (mm)	100	125	150	200	300
Diametro del pistone (mm)	75	91	108	148	216
Corsa del pistone (mm)	100	102	102	100	100
Peso del martello (kg)	38.5	68.5	108	177	624
Consumo d'aria (m ³ /min cm)	4.7	6.7	10.1	17.1	28.2
Rapporto diam. Foro/diam. Pistone	1.33	1.37	1.39	1.35	1.39
Consumo relativo d'aria (m ³ /min cm)	0.47	0.54	0.67	0.86	0.94

4.5 Analisi di un sistema di perforazione con martelli fondo foro

Il presente studio si propone di esaminare, in termini analitici generali, la perforazione mediante martello fondo-foro, allo scopo di evidenziare i parametri principali che la condizionano.

Lo studio non pretende di risolvere il problema ma semplicemente di sottoporlo all'attenzione di studiosi e di tecnici.

Il martello fondo-foro è una macchina pneumatica che opera al fondo del foro. E' alimentata da aria compressa attraverso le aste, ed aziona una massa battente che, agendo su un utensile, trasmette al terreno una energia d'urto che lo frantuma.

Le funzioni fondamentali che regolano la perforazione con martello fondo-foro sono sostanzialmente tre:

- la funzione abbattimento del terreno;
- la funzione allontanamento dei detriti prodotti con l'abbattimento;
- la funzione rotazione che fa cambiare posizione all'utensile fra un urto ed il successivo.

La prima funzione è svolta dalla macchina. La seconda dipende, tra l'altro, dalle caratteristiche della macchina. La terza è svolta dalla macchina stessa mediante le aste di perforazione.

Nel presente studio verranno esaminate analiticamente le prime due.

4.5.1 Il martello fondo foro

La macchina si compone essenzialmente di un pistone toroidale (Figura 47) di massa M che si muove all'interno di un cilindro di diametro d_p compiendo una corsa c_p . Il moto alternativo è dovuto alla azione della pressione dell'aria che agisce sulle due facce del pistone.

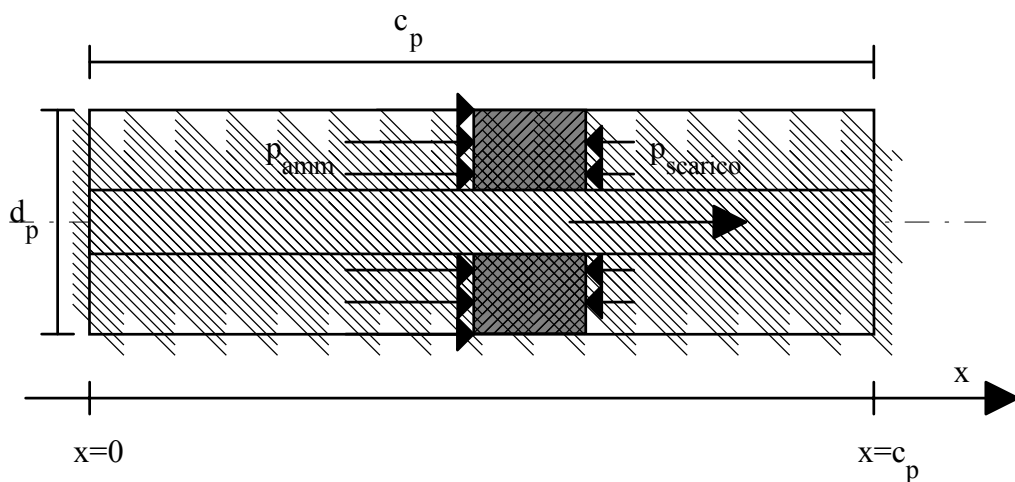


Figura 47 - Schema del motore pneumatico

Oltre alle caratteristiche geometriche di cui sopra, i parametri che regolano il funzionamento della macchina sono:

- il salto pressione Δp fra la pressione di alimentazione (p_{amm}) e la pressione di scarico ($p_{scarico}$);
- la portata di aria di alimentazione Q_{al} misurata alla pressione atmosferica.

La potenza della macchina è espressa da

$$W = Q_{al} \cdot \Delta p$$

dove Q_{al} è data da

$$Q_{al} = V_c \cdot n_c$$

dove n_c è il numero di colpi battuto dal pistone nell'unità di tempo e V_c è la somma dei volumi delle due camere in cui il pistone divide il cilindro,

$$V_c = 2 \cdot c_p \cdot A_p \quad (4.1)$$

dove A_p è la sezione del cilindro.

Quindi si può scrivere

$$Q_{al} = V_c \cdot n_c = 2 \cdot c_p \cdot A_p \cdot n_c \quad (4.2)$$

$$W = Q_{al} \cdot \Delta p = 2 \cdot c_p \cdot A_p \cdot n_c \cdot \Delta p$$

La portata richiesta dipende quindi dalle caratteristiche geometriche della macchina (corsa ed alesaggio), dal numero di colpi al secondo e dalla differenza fra pressione dell'aria di alimentazione alla macchina e pressione di scarico dalla macchina.

Il pistone si muove sotto l'azione dell'aria alla pressione p_{amm} . Poiché la macchina è ad "ammissione totale", la pressione p_{amm} si mantiene costante per tutta la corsa c_p del pistone. Di conseguenza, il pistone è animato di moto uniformemente accelerato ed il suo spostamento è dato da:

$$x = x_o + v_o \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad (4.3)$$

dove v_o è la velocità iniziale del pistone.

Assumendo il riferimento cartesiano di figura 47, la posizione iniziale del pistone si trova sull'origine dell'asse delle ascisse ($x_o = 0$) e, ammettendo che l'urto tra pistone e fioretto sia perfettamente anelastico ($v_o = 0$), lo spostamento del pistone sarà dato da,

$$x = \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad (4.4)$$

dove a è l'accelerazione impressa al pistone.

Essendo noto lo spostamento del pistone (pari alla sua corsa c_p) è noto il tempo impiegato per percorrerlo, corrispondente al semi-periodo,

$$\frac{T}{2} = \sqrt{\frac{2 \cdot c_p}{a}} \quad (4.5)$$

Per conoscere l'accelerazione a si fa ricorso al poligono delle forze che agiscono sul pistone, e che sono:

- la forza che agisce su una faccia del pistone e che è proporzionale alla pressione di ammissione dell'aria p_{amm} ;
- la forza che agisce sull'altra faccia del pistone e che è proporzionale alla pressione di scarico $p_{scarico}$ ed ha segno contrario alla precedente;
- la forza di gravità, P (che dipende dalla direzione nella quale opera il martello);
- le forze di attrito A che si sviluppano tra pistone e parete del cilindro.

Per l'equilibrio delle forze, indicando con M la massa del pistone si ha,

$$\sum F_e = Ma = p_{amm} A_p - p_{scarico} A_p + P - A \quad (4.6)$$

Ipotizzando trascurabili le forze di attrito A e la forza di gravità P , l'accelerazione del pistone è

$$a = (p_{amm} - p_{scarico}) \frac{A_p}{M} \quad (4.7)$$

E' così possibile conoscere il tempo che impiega il pistone per compiere un singolo ciclo,

$$T = \sqrt{\frac{8 \cdot c_p \cdot M}{(p_{amm} - p_{scarico}) \cdot A_p}} \quad (4.8)$$

Il numero di colpi al secondo, corrispondente alla frequenza con cui il pistone compie il percorso completo, è pari all'inverso del periodo, cioè

$$n_c = \sqrt{\frac{(p_{amm} - p_{scarico}) \cdot A_p}{8 \cdot c_p \cdot M}} \quad (4.9)$$

Sostituendo la (4.9) nella (4.2) si ottiene l'espressione finale che consente di ricavare la portata di aria richiesta al funzionamento del martello

$$Q_{al} = \sqrt{\frac{c_p \cdot A_p^3 \cdot (p_{amm} - p_{scarico})}{2 \cdot M}} \quad (4.10)$$

e la potenza disponibile,

$$W = \sqrt{\frac{c_p \cdot A_p^3 \cdot (p_{amm} - p_{scarico})^3}{2 \cdot M}} \quad (4.11)$$

Come già detto, la portata dipende, oltre che dalle caratteristiche geometriche della macchina, anche dalla massa del pistone e dalla differenza di pressione tra ammissione e scarico dell'aria. Per aumentare la potenza si deve aumentare la differenza di pressione tra ammissione e scarico. Aumentando la differenza di pressione si aumenta anche la portata di aria. In particolare si deve osservare che per raddoppiare la portata di aria a parità di tutte le altre condizioni sarebbe necessario raddoppiare la differenza di pressione tra ammissione e scarico.

4.5.2 Analisi energetica dell'azione utensile-terreno

L'interazione tra il terreno e l'utensile, nel caso di perforazione a percussione, consiste nel trasferimento di energia dal pistone in moto al terreno. L'urto del pistone sull'utensile produce un accorciamento di quest'ultimo, e un'onda di compressione si muove attraverso l'utensile per trasmettersi al terreno. In particolare la trasmissione dell'onda di compressione al terreno dipende dalla reazione applicata allo scalpello e più precisamente:

- se non vi è reazione sullo scalpello, cioè se esso non è in contatto con la roccia non vi è trasmissione, e l'onda è totalmente riflessa come onda di tensione;
- se lo scalpello è premuto contro la roccia con una appropriata spinta, l'energia è trasmessa tutta o in parte alla roccia;
- se lo scalpello è premuto con una spinta eccessiva non vi è trasmissione, e l'onda è riflessa come onda di compressione.

Per tener quindi presente tale fenomeno abbiamo introdotto il rapporto tra la spinta applicata allo scalpello e la forza esercitata dal pistone sullo scalpello stesso. Infatti, se non vi è spinta sullo scalpello la forza agente sullo scalpello farebbe sollevare tutta la macchina. Se invece la spinta sullo scalpello fosse eccessiva l'insieme macchina ed aste si irrigidirebbe eccessivamente mantenendo così al suo interno le onde di compressione prodotte dal pistone.

La trasmissione di energia all'interfaccia utensile-terreno dipende dall'impedenza acustica dei due mezzi. L'impedenza acustica è definita come il rapporto tra massa volumica e velocità di propagazione del suono nel mezzo. Il rendimento di trasmissione è dato dalla relazione:

$$\eta_a = 1 - \frac{(I_u - I_t)^2}{(I_u + I_t)^2}$$

dove

I_u è l'impedenza acustica dell'utensile,

I_t è l'impedenza acustica del terreno.

Supponendo che l'utensile sia in acciaio la sua impedenza acustica sarà pari a

$$I_u = \rho_a \cdot c_a = 7900 \cdot 5100 = 4.097 \cdot 10^7$$

Se il terreno è un calcare ($I_t = 1.04 \cdot 10^7$) possiamo calcolare il rendimento di trasmissione,

$$\eta_a = 1 - \frac{(4.029 \cdot 10^7 - 1.04 \cdot 10^7)^2}{(4.029 \cdot 10^7 + 1.04 \cdot 10^7)^2} = 0.65$$

Come si può constatare il rendimento è molto basso a causa della differenza di densità dei due mezzi.

L'azione della spinta sullo scalpello si può schematizzare in un aumento o diminuzione dell'impedenza acustica dell'utensile, cosicché si scrive,

$$\eta_a = 1 - \frac{(\eta_{sp} I_u - I_t)^2}{(\eta_{sp} I_u + I_t)^2} = \frac{4\eta_{sp} I_u I_t}{(\eta_{sp} I_u + I_t)^2}$$

Si può da essa determinare la condizione di massimo rendimento di trasmissione η_a per il seguente valore di η_{sp} ,

$$\eta_{sp} = \frac{I_t}{I_u}$$

L'energia trasmessa al terreno dall'utensile sarà:

$$E_t = \eta_a \cdot E$$

L'energia trasmessa verrà impiegata per l'abbattimento come già discusso al paragrafo 2.1.2. Rimane da valutare il coefficiente B relativo al rendimento di sollevamento dei detriti.

4.5.3 Analisi del processo di abbattimento e riduzione dei detriti

L'asportazione dei detriti dal fondo del foro è svolta dalla stessa aria impiegata per il funzionamento della macchina.

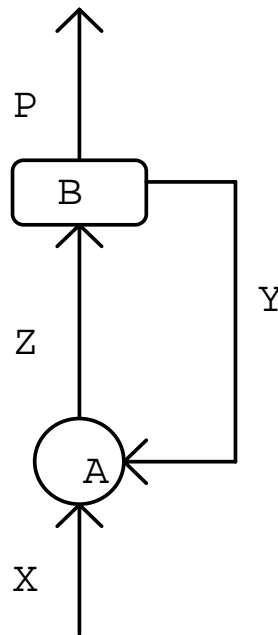


Figura 48 - Schema funzionale del processo di abbattimento e classificazione che avviene al fondo del foro.

L'abbattimento produrrà certamente dei detriti di dimensioni assortite distribuiti secondo una certa distribuzione granulometrica.

Si può ritenere che l'azione di allontanamento dei detriti dal fondo del foro, operata dall'aria, sia analoga ad una classificazione per gravità e dimensione. Esisterà una dimensione limite delle particelle al di sopra della quale non si ha asportazione del detrito, a causa della sua velocità di caduta maggiore di quella dell'aria. Si avrà di conseguenza un ricircolo di detriti che verranno sottoposti ad una serie di rotture successive fino al raggiungimento della dimensione limite richiesta perché siano presi in carico dalla corrente fluida.

Si ritiene quindi che non sia possibile assicurare lo spurgo completo del fondo del foro evacuando la quantità di detriti prodotta.

In pratica si possono schematizzare le operazioni elementari che avvengono al fondo del foro come riportato nello schema di figura 36. Realizzando un bilancio di materia sui singoli nodi, corrispondenti alle operazioni di frantumazione (A) e classificazione (B), otteniamo, a regime,

$$\text{nodo A} \quad Z = X + Y$$

$$\text{nodo B} \quad Z = P + Y$$

Uguagliando i bilanci ai nodi si ottiene

$$P = X$$

per cui una quantità di detriti pari alla quantità prodotta dall'abbattimento viene asportata, ma si ha un ricircolo di materia pari a

$$Y = X \frac{(1-B)}{B}$$

Il termine B corrisponde alla percentuale di solido di dimensioni inferiori alla dimensione limite di sollevamento.

La macchina quindi nella successiva fase di abbattimento dovrà agire sia sul terreno da abbattere sia sui detriti non sollevati.

Se si ipotizza che l'abbattimento non sia influenzato dalla presenza dei detriti si produrrà una quantità costante di detriti pari ad X . Ma la macchina dovrà agire anche sulla quantità Y di detriti non asportati perché troppo grandi. Si renderà quindi necessario spendere una parte di energia per la rifrattumazione riducendo la quota parte necessaria all'avanzamento. Questo comporta una riduzione del volume di detriti nuova produzione.

Il rendimento della funzione di classificazione nel nodo B sarà pari a:

$$\eta_c = \frac{P}{Z} = B \quad \text{essendo} \quad P = B \cdot Z$$

Di conseguenza si deve mantenere alto il valore del rendimento B perché al suo diminuire aumenta la massa di detriti non asportati.

Sarà quindi importante realizzare un sollevamento con una efficienza elevata al fine di portare in condizioni ottimali di funzionamento il martello fondo foro. Si ricorda che il rendimento di sollevamento è direttamente legato alla dimensione limite delle particelle e che possiamo porla pari alla frazione cumulata di passante relativo a tale dimensione nella distribuzione granulometrica.

4.5.4 Il moto dei detriti nell'intercapedine aste-foro

Il sollevamento dei detriti prodotti dall'abbattimento del terreno avviene nello spazio anulare delimitato esternamente dalla parete del foro ed internamente dalle aste di perforazione. Esso può essere schematizzato, nel caso di un foro ideale, come un cilindro anulare, di spessore costante, che si sviluppa dal fondo del foro sino alla superficie (vedi figura 49).

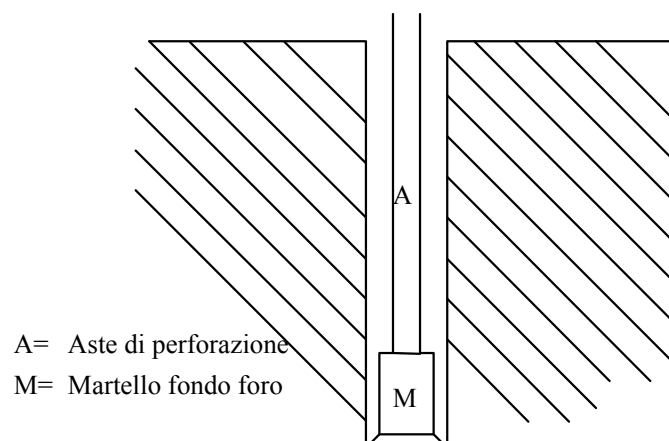


Figura 49 - Sezione longitudinale di un foro ideale

Il martello ha un diametro esterno superiore a quello delle aste per cui in corrispondenza di esso il cilindro anulare ha spessore inferiore.

I detriti vengono rimossi dal fondo dall'aria e sollevati lungo il condotto. Si forma così un fluido bifase (aria-solido) in cui il carico solido è funzione diretta della velocità della corrente gassosa. Infatti le particelle vengono sollevate solo se la velocità della corrente è superiore alla loro velocità di caduta come già discusso nel paragrafo 2.2.2. E' quindi importante esaminare l'andamento delle velocità nello spazio anulare di risalita.

La velocità dell'aria v_f nella sezione anulare è stata assunta pari al valore medio

$$v_f = \frac{4 \cdot Q_g}{\pi \cdot (d_{\text{foro}} - d_{\text{aste}})^2} = \frac{4 \cdot Q_g^o}{\pi \cdot (d_{\text{foro}} - d_{\text{aste}})^2} \left(\frac{p^o}{T^o} \right) \left(\frac{T_a}{p_a} \right) \quad (4.12)$$

dove

$$p_a = \frac{(p_{\text{scarico}} + p_{\text{atm}})}{2} = p_{\text{atm}} + \frac{\Delta p}{2} \text{ è la pressione media nel condotto;}$$

T_a è la temperatura media nel condotto;

Q_g^o è la portata di aria in condizioni standard ($T^o = 0^\circ \text{C}$, $p^o = 1.013$ bar)

Risulta evidente che una volta fissata la portata Q_g^o , la velocità v_f e quindi la v_p , dipende dalla differenza $(d_{\text{foro}} - d_{\text{aste}})$ e dal regime di pressioni presenti nel foro. Un criterio conservativo per assicurare il sollevamento di particelle di dimensione d è assumere:

$$v_f = 2 \cdot v_p \quad (4.13)$$

4.5.5 Analisi del flusso attraverso il condotto di scarico

Attraverso il condotto di scarico viene evacuata l'aria *esausta* servita ad azionare il motore pneumatico posizionato al fondo del foro. Questo condotto costituisce l'unica via per l'asportazione dei detriti solidi prodotti dall'abbattimento sul fondo del foro. Se il foro è asciutto il fluido che transita nel condotto è una miscela gas-solido che risale attraverso un condotto di sezione anulare. All'uscita del condotto la pressione è pari alla pressione atmosferica.

La pressione di scarico della macchina è determinabile attraverso la conoscenza della geometria del condotto, delle perdite di carico in tale condotto e del valore della pressione all'uscita dal foro.

Il fluido vettore, ossia l'aria, è comprimibile e di conseguenza è necessario integrare l'equazione di conservazione della quantità di moto lungo l'intero condotto al fine di considerare le variazioni delle proprietà del fluido. L'equazione di conservazione della quantità di moto, è

$$\frac{dp}{dz} = -\rho_m \cdot g \cdot \cos\theta - G^2 \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{\rho_m} \right) - \frac{1}{D} \frac{G^2}{2} \lambda \frac{1}{\rho_m} \Phi_{tp}^2 \quad (4.14)$$

dove

θ è l'angolo formato dall'asse del condotto rispetto alla verticale;

$\rho_m = \alpha \cdot \rho_s + (1 - \alpha) \cdot \rho_g$ è la massa volumica della miscela;

$G = v_m \cdot \rho_m$ è la velocità massica o portata in massa specifica;

Φ_{tp}^2 è il moltiplicatore bifase che opera una correzione delle perdite di carico per attrito.

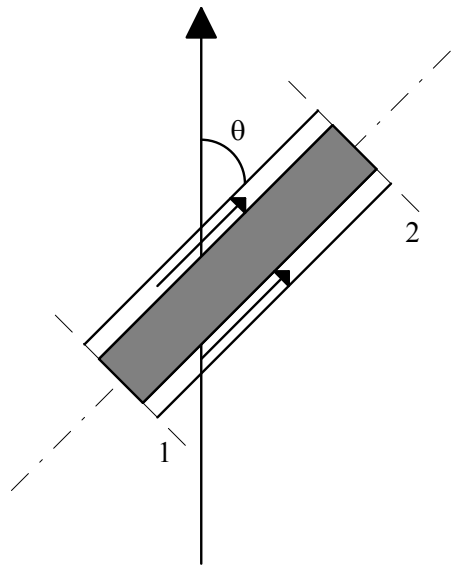


Figura 50 - Tratto del condotto di deflusso

Se si considera il generico tratto di condotto di lunghezza dL con sezioni di ingresso e di uscita 1 e 2 (vedi figura 41) e si integra la precedente espressione (4.14) si ottiene,

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho_m g \cos\theta + \frac{1}{D_{eq}} \frac{G^2}{2} \lambda \frac{1}{\rho_m} \Phi_{tp}^2}{1 + G^2 \frac{dv}{dp}} dL \quad (2.12)$$

dove

$$\frac{dv}{dp} = -\frac{RT}{Mp^2}, \text{ avendo considerato l'aria come gas perfetto;}$$

D_{eq} è il diametro equivalente del condotto anulare pari a

$$D_{eq} = d_{foro} \frac{\left[1 - \left(\frac{d_{aste}}{d_{foro}} \right)^2 \right]}{\left(1 + \frac{d_{aste}}{d_{foro}} \right)}$$

Assunto il condotto verticale ($\cos\theta=1$), la pressione di ingresso del fluido nel tratto di condotto dL è data da,

$$p_1 = p_2 + \frac{\rho_m g - \frac{1}{D_{eq}} \frac{G^2}{2} \lambda \frac{1}{\rho_m} \Phi_{tp}^2}{1 - G^2 \frac{RT_a}{Mp_1^2}} dL \quad (4.15)$$

In questo modo è possibile calcolare la pressione a monte del singolo tratto di condotta e quindi risalire al fondo del foro e determinare la pressione allo scarico della macchina.

La conoscenza di tale pressione consente di calcolare la potenza richiesta per il sollevamento dei detriti per mezzo dell'espressione,

$$W = Q_a \cdot (p_{scarico} - p_u)$$

dove

Q_a è la portata di aria necessaria al sollevamento;

$p_{scarico}$ è la pressione allo scarico della macchina;

p_u è la pressione in uscita, in superficie (p_{atm}).

Si coglie immediatamente che qualora la potenza necessaria allo spurgo del foro non sia fornita dalle condizioni di esercizio, ovvero dalla portata di aria impiegata dalla macchina e dalla differenza di pressione agente sul condotto di risalita, è necessario ricorrere a fonti accessorie di potenza. In particolare si nota che, per incrementare la potenza W si potrebbero seguire due vie: aumentare la pressione iniziale $p_{scarico}$ o aumentare la portata Q_a . Aumentare la pressione iniziale significa, però, significa aumentare la pressione di scarico e, quindi, ridurre il lavoro della macchina. Rimane allora soltanto l'aumento della portata di aria per cui la soluzione possibile è una alimentazione secondaria di aria al fondo del foro.

E' interessante analizzare l'andamento della potenza richiesta al sollevamento di particelle in funzione del loro diametro.

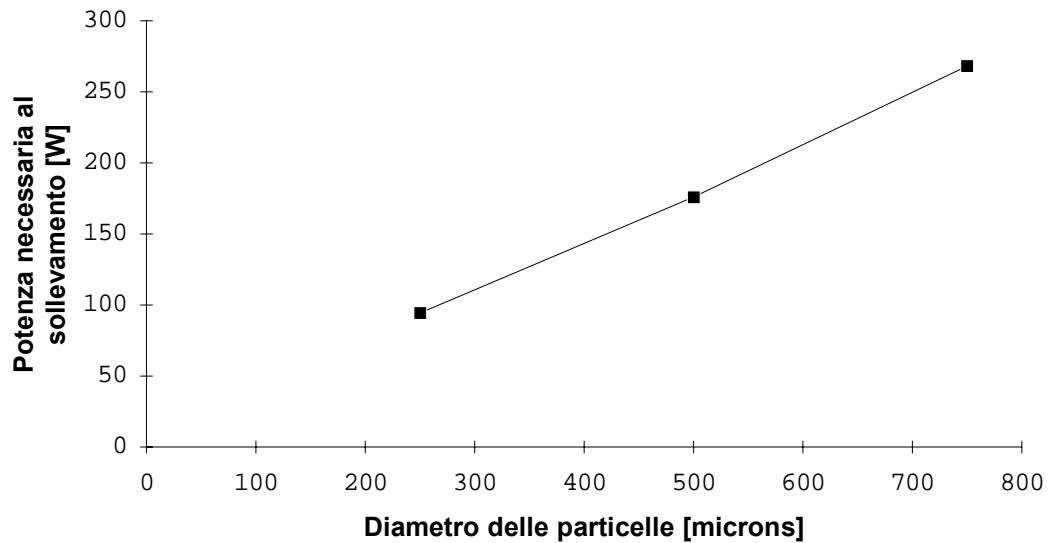


Figura 51 - Andamento della potenza richiesta al sollevamento di particelle in funzione del loro diametro

In figura 51 si vede che per sollevare delle particelle di dimensioni maggiori occorre spendere maggiore energia. Questa energia viene sottratta al lavoro che svolge la macchina in quanto aumenta la pressione allo scarico.

Per quello che riguarda il rendimento di sollevamento dei detriti, questo è legato alla distribuzione granulometrica che si ottiene alla rottura.

4.5.6 Analisi della funzione di circolazione applicata a martelli fondo foro commerciali

In questo paragrafo vengono confrontati i risultati ottenuti con il modello di risalita dei detriti con i dati dei martelli fondo foro attualmente in commercio.

Per questa analisi si assumono costanti le seguenti caratteristiche del foro:

- profondità 100 metri;
- pressione di superficie, 1.013 bar;
- temperatura dell'aria, 15 °C;
- massa volumica dei granuli, 2600 kg/m³ (Calcere).

Inoltre si considera che la velocità dell'aria richiesta per garantire un sollevamento delle particelle solide di dimensione d_{lim} sia pari a due volte la loro velocità limite. Effettuando l'integrazione delle pressioni lungo il condotto di spurgo, si ricava la portata di aria necessaria per il trasporto dei detriti di dimensioni inferiori a d_{lim} .

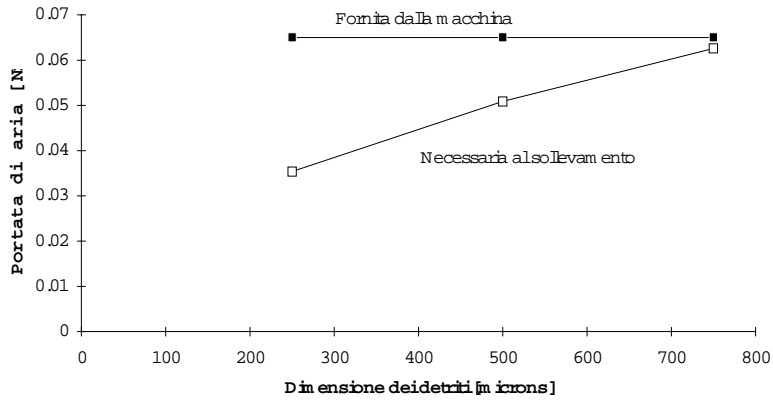
I risultati del calcolo sono riportati nella seguente tabella per vari diametri del foro.

Diametro foro	Diametro particella limite	Portata di aria	Pressione fondo foro
[mm]	[μm]	[Nm ³ /s]	[bar]
85	250	0.0359	1.034
	500	0.0509	1.041
	750	0.0626	1.048
100	250	0.0497	1.032
	500	0.0704	1.038
	750	0.0865	1.044
150	250	0.1116	1.029
	500	0.1580	1.033
	750	0.1939	1.036

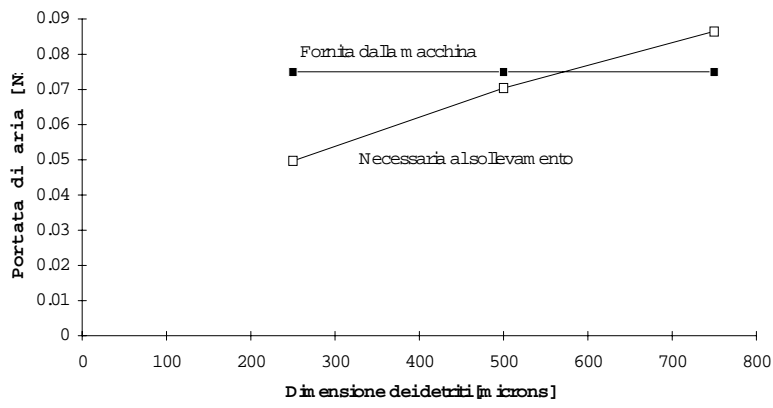
Si evidenzia immediatamente che aumentando la dimensione dei detriti devo aumentare la portata, con conseguente aumento della pressione a fondo foro. Nell'ulteriore, sottostante tabella sono riportati i valori medi della portata di aria nominale indicata dai produttori e i relativi valori di pressione di esercizio per diversi diametri di foro.

Diametro di perforazione (minimo)	Portata di aria nominale	Pressione di esercizio
[mm]	[Nm ³ /s]	[bar]
84	0.068	6.67
102.6	0.075	6.71
151.3	0.170	9

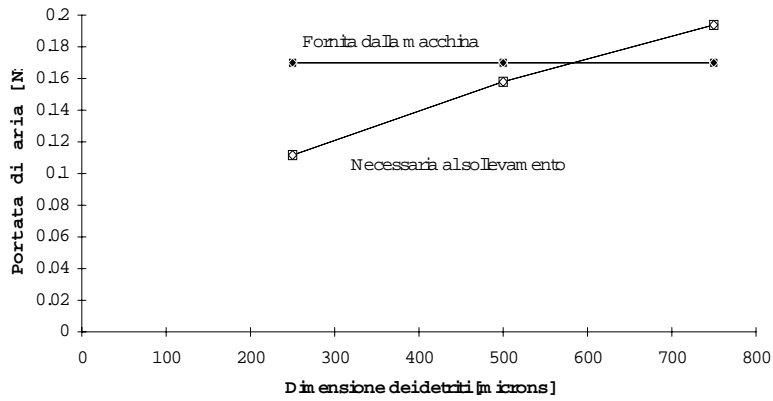
Confrontando i valori di portata nominale delle macchine ed i valori richiesti per assicurare il trasporto dei detriti di dimensione fissata si evidenzia come per i due diametri maggiori di perforazione non si possa realizzare il sollevamento dei detriti di dimensione di 750 microns, mentre per il minore tale dimensione costituisce un limite superiore. Si rende quindi necessario conoscere quale sia la distribuzione granulometrica dei detriti per poter successivamente conoscere quale sia l'efficienza di sollevamento in tali macchine.



a) $d_f = 84 \text{ mm}$



b) $d_f = 102,6 \text{ mm}$



c) $d_f = 151,3 \text{ mm}$

Figura 52 - Andamenti della portata di aria necessaria al sollevamento per i tre diametri di foro considerati.

5 *La perforazione a rotazione*

Nella perforazione di un pozzo, come in ogni altra operazione di scavo, si presenta la necessità di realizzare in sostanza due azioni: vincere la resistenza del materiale in cui si opera in modo da staccare parti di esso dalla formazione e rimuovere queste parti per continuare ad agire su nuovo materiale ottenendo così un avanzamento della perforazione stessa.

L'abbattimento della roccia avviene in pratica o per urto contro di essa di opportuni attrezzi (fioretti di perforatrici, denti di scalpelli a rotazione), o per azione abrasiva di adatti materiali (generalmente impasti a base di diamanti in particolari scalpelli o corone di carotieri).

Industrialmente l'azionamento degli organi di scavo avviene sempre per via meccanica, secondo due tecniche: quella a percussione e quella a rotazione. (Una terza tecnica, la rotopercussione, è impiegata solo per la esecuzione di piccoli fori, ad esempio fornelli da mina; ed in effetti lo scavo avviene per percussione, servendo la rotazione solo a mutare la posizione dello scalpello nel foro per assicurare la circolarità della sezione).

Il tipo di tecnica impiegata condiziona il metodo di rimozione del materiale di risulta dal foro.

La perforazione a percussione è stata la prima ad essere usata e tuttora trova utilizzo, più nel campo civile che in quello petrolifero, per lo scavo a piccole profondità in formazioni incoerenti o comunque di scarsa durezza.

Si realizza lasciando cadere da adeguata altezza uno scalpello appesantito sul fondo del pozzo che viene escavato; il sollevamento dell'attrezzo per prepararlo al colpo è attuato o con un argano o con un bilanciere cui esso è collegato attraverso una fune o un'asta rigida e che dall'altra parte è azionato da un motore.

La perforazione può essere condotta, a seconda dei casi, sia a secco che in foro riempito di fluido (acqua o fango); in ogni caso è necessario sospendere periodicamente il lavoro per calare nel pozzo una cucchiaia con cui portare a giorno il materiale abbattuto; ciò rende il processo eminentemente discontinuo. Quanto al fango, cui si è accennato, la sua funzione è di favorire la stabilità delle pareti del foro e contrastare l'ingresso dei fluidi di strato.

Questo sistema di scavo, relativamente semplice ed economico, oltre ai predetti limiti di profondità e di consistenza delle formazioni, non permette la perforazione in direzione diversa dalla verticale, e l'uso del fango in pozzo, con la conseguente spinta di galleggiamento sullo scalpello, limita l'efficacia della battuta di questo.

La perforazione a rotazione, o “rotare”, utilizza invece uno scalpello rotante, perennemente a contatto del fondo foro, su cui esercita una opportuna pressione.

Lo scalpello si trova all'estremità di una batteria di aste tubolari a sezione circolare che giunge a giorno, e per mezzo della quale è possibile calarlo in pozzo o recuperarlo, trasmettergli il moto di rotazione originato in superficie da un apposito organo, la tavola rotary, e far circolare nel pozzo il fluido di perforazione (fango). Alla pressione di mandata di questo è talora devoluto il compito far ruotare lo scalpello, a mezzo di una turbina idraulica subito sopra di esso, e in tal caso allora la batteria non ruota.

Il fango circolante in ogni caso svolge, assieme ad altre, la funzione di portare in superficie il materiale scavato, rendendo continuo il lavoro.

Con il sistema rotary è possibile perforare sino alle massime profondità raggiungibili, in materiali di qualsiasi natura e caratteristica meccanica, deviando anche sensibilmente dalla verticale: per queste ragioni è ormai la tecnica di uso corrente in campo petrolifero.

Comunque venga eseguito il foro, si usa poi rivestirlo con una o più tubazioni metalliche (casing) cementate alle sue pareti, che garantiscono la stabilità dello scavo sia durante il suo approfondimento che nel successivo utilizzo e lo isolano rispetto ai fluidi presenti negli strati che attraversa.

5.1 Cantiere di Perforazione

La perforazione può essere effettuata sia in terra (on-shore) che in mare (off-shore).

Pur presentando le stesse caratteristiche principali, per quanto riguarda la perforazione, gli impianti utilizzati variano a seconda del loro campo d'impiego, così come variano le problematiche del lavoro a seconda che si operi in mare o in terra.

In particolare, gli impianti marini sono costituiti da piattaforme autonome (galleggianti o meno) e da navi (drilling-ships) che in spazi limitati devono rispondere a tutte le esigenze del cantiere, non ultimo l'alloggio del personale, che in terra naturalmente possono più facilmente trovare una soluzione.

Ancora gli stessi problemi logistici, legati ai collegamenti tra cantiere e sede, sono normalmente molto più sentiti in mare; è questo il motivo per il quale tutti gli impianti off-shore sono provvisti di eliporto.

Prima di analizzare in dettaglio le varie parti che compongono un impianto di perforazione, vediamo brevemente come è organizzato un impianto e soprattutto quali sono le caratteristiche proprie dei vari impianti.

5.2 Impianto di Perforazione a terra

Seguendo una schema abbastanza tipico, è possibile dire che il cantiere si sviluppa attorno ad un nucleo centrale costituito dalla testa pozzo e dall'impianto di perforazione.

Nelle immediate vicinanze possiamo distinguere tre zone adiacenti: nella prima sono alloggiati i motori ed i generatori per la produzione di energia elettrica, il sistema di raffreddamento e la cabina di trasformazione dalla quale si dipartono le linee di alimentazione per le varie utenze; la seconda è quella destinata alle apparecchiature dell'impianto di preparazione e circolazione del fango (silos di stoccaggio dei componenti per la preparazione, le vasche contenenti il fango di perforazione, il gruppo di pompaggio, il vibrovaglio per la separazione dei detriti, le vasche dei rifiuti ed il centro raccolta dati di perforazione ed analisi dei campioni geologici).

Completano perifericamente il cantiere tutte quelle infrastrutture necessarie alla conduzione ed alla manutenzione dei macchinari, come i serbatoi per il combustibile dei motori, i magazzini dei materiali ed eventuali baracche ad uso ufficio.

5.3 Impianto di Perforazione a mare

Esistono essenzialmente tre tipi di impianti off-shore utilizzati per la perforazione in mare aperto: JACK-UP, SEMISOMMERSIBILE, DRILL SHIP.

Il jack-up è una piattaforma mobile di tipo autosollevante. Si tratta di una struttura galleggiante rimorchiabile, dalla quale vengono calate mediante un sistema di pignoni e cremagliere tre o più gambe che vanno a poggiare sul fondo; la struttura viene poi ulteriormente sollevata per porla ad un livello superiore a quello delle alte maree e delle massime altezze d'onda prevedibili.

Per ragioni strutturali tale tipo di impianto è utilizzato per la perforazione in acque profonde al massimo 120 - 150 metri. La testa pozzo risiede sempre nella piattaforma.

L'impianto semisommersibile è costituito da una piattaforma in carpenteria metallica di vario disegno. In passato si sono utilizzate: piattaforme semisommersibili a 3 e a 5 piloni. Attualmente le più usate sono a 4 o 6 piloni. I piloni sono delle colonne cave di grande diametro che poggiano su scafi sommersi. L'altezza della piattaforma sul livello del mare può essere regolata zavorrando più o meno le colonne con acqua di mare. Tale tipo di impianto ha un periodo naturale di rollio e beccheggio più lunghe del periodo delle onde normalmente incontrate in mare aperto da cui consegue una confortevole condizione di lavoro poco influenzata dal movimento delle onde.

Il posizionamento è di tipo statico, cioè con un sistema di ancore le quali hanno una capacità di tenuta che dipende dall'affondamento delle marre nel fondale marino. I mezzi con i quali vengono calate le ancore sono generalmente catene, cavi d'acciaio, sistemi misti catena-cavo.

Gli impianti semisommersibili non sono dotati di un sistema di propulsione e vengono utilizzati per la perforazione fino ad acque profonde all'incirca 400 metri. Utilizzano teste pozzo sottomarine.

Le drilling-ship (navi di perforazione) sono unità dotate di propulsione propria con i medesimi criteri delle navi convenzionali.

Oltre alla presenza dell'impianto di perforazione, la caratteristica più singolare è l'apertura centrale (moon pool) ricavata nella carena della nave sotto la tavola rotary.

Una nave di perforazione impiega normalmente gli ormeggi per il mantenimento sul posto. La tecnica più avanzata fornisce tipi di navi con posizionamento dinamico.

Col termine posizionamento dinamico si intende la tecnica di mantenere l'impianto in postazione per azione di un sistema di propulsori. La posizione della nave viene rilevata per mezzo di un sistema di riferimento acustico. Esso è composto di un emittente di onde sonore collocate sul fondo del mare, di idrofoni riceventi applicati sotto lo scafo della nave e di un'unità sensibile agli spostamenti verticali oltre che di un computer. Il computer elabora i dati di spostamento dell'impianto ed interviene sul sistema di propulsione in modo da riportare la nave in postazione. E' bene dire che è ammesso uno scarto massimo di posizionamento rispetto alla verticale di circa 5 gradi. Il posizionamento dinamico è indispensabile quando si opera su fondali molto profondi ed offre il vantaggio di permettere la libera rotazione della nave e quindi consente il miglior orientamento nei confronti del vento, delle correnti e delle onde. Come per gli impianti semisommersibili, le drilling-ships utilizzano teste pozzo sottomarine e vengono impiegate per la perforazione in acque profonde fino a 2000 metri circa.

5.4 Impianto di Perforazione

Nella perforazione "rotary", di cui esclusivamente si parlerà in seguito, l'impianto deve assolvere essenzialmente a tre funzioni:

- sollevamento, o più esattamente manovra, degli organi di scavo (batteria, scalpello);
- rotazione degli stessi;
- circolazione del fluido di scavo;

Esse sono svolte da sistemi indipendenti, che ricevono l'energia da un gruppo motore comune.

5.4.1 Gruppo motore

A tale sezione dell'impianto è devoluto il compito di generare l'energia necessaria al funzionamento di tutto l'impianto.

Si usano sempre motori a combustione interna, generalmente Diesel; in passato frequentemente anche a gas, liquido o naturale, e accensione a scintilla.

Le potenze installate, funzione della dimensione dell'impianto e della profondità che si deve raggiungere, sono spesso dell'ordine di alcune migliaia di cavalli, ripartite sempre tra più motori opportunamente

collegati. Tale accoppiamento di potenza, e la trasmissione di questa agli organi utilizzatori, è realizzato per via meccanica od elettrica.

5.4.2 Trasmissione meccanica

Più usata in passato, viene realizzata dotando ogni motore di accoppiamenti idraulici o convertitori di coppia, i cui assi uscenti recano ruote collegate tra loro da catene di trasmissione.

Questo sistema di ruote e catene, denominate "compound", trasmette l'energia alla tavola "rotary"; le pompe del fango la ricevono invece attraverso cinghie.

5.4.3 Trasmissione elettrica

La più usata attualmente, si ottiene dotando ogni motore Diesel di un generatore di corrente elettrica, che attraverso cavi va ad un quadro di accoppiamento e da qui è distribuita alle utenze, tutte azionate da motori elettrici.

Tra i vantaggi di questo sistema è il non necessitare di allineamento meccanico dei motori e la possibilità di allontanarli dalla sonda con conseguente diminuzione del rumore nell'ambiente di lavoro.

5.5 Impianto di sollevamento

E' costituito dall'argano, dalla torre, dalle taglie fissa e mobile, e dalla fune. La sua funzione principale è di permettere le manovre di sollevamento e discesa in foro della batteria di aste e del casing.

5.5.1 L'argano

L'argano è costituito da un tornello attorno al quale si avvolge o svolge la fune di sollevamento della taglia mobile.

Esso è dotato quindi di un inversore di marcia, di cambio di velocità e dispositivi di frenaggio.

Un tornello più piccolo ospita alcune migliaia di metri di cavo per operazioni speciali, e due cabestani permettono per frizione di tirare corde di manovre per sollevare pesi, azionare chiavi, etc. Per questi fini trovano sempre più larga applicazione arganelli ad aria compressa di uso più facile e sicuro.

Il freno principale, doppio e raffreddato ad acqua, del tipo a nastro rivestito in ferodo, consente di arrestare e mantenere fermo il tornello.

Quando intervengono momenti extra dovuti a carichi pesanti, non governabili col solo freno principale, si fa intervenire il freno ausiliario.

Esso può essere idraulico, e allora l'azione frenante è dovuta alla resistenza che l'acqua contenuta in una carcassa incontra nel passare da una palettatura mobile solidale col tornello ad una fissa, oppure elettromagnetico, in cui un rotore in ferro rotante in un campo magnetico viene frenato per effetto delle correnti di Foucault.

Il freno elettromagnetico ha sull'altro il vantaggio di essere privo di attriti, non necessitare di innesti particolari, agire in un campo di velocità tra 0 e 800 r.p.m.

5.5.2 La torre

E' la struttura metallica a traliccio che sostiene la taglia fissa di rinvio della fune.

Essa appoggia su un basamento terreno recante superiormente il piano sonda, ossia il piano di lavoro della squadra di perforazione.

La torre può essere realizzata in modi diversi.

Il *derrick*, che rappresenta la struttura tradizionale, è una torre a base quadra rastremata verso l'alto che consiste di elementi di profilato che devono venire assemblati di volta in volta da una apposita squadra.

Il *mast* invece è assemblato una volta per tutte ed è trasportabile scomposto in un esiguo numero di parti; la sua messa in opera consiste nell'assiemarla orizzontalmente a terra con gru semoventi, incernierandolo alla sottostruttura e quindi portandolo in posizione verticale per mezzo dell'argano.

All'altezza corrispondente ad una lunghezza di aste, generalmente tre aste di perforazione unite insieme, è posizionata sulla torre una piccola piattaforma sulla quale lavora il pontista; circa alla stessa altezza vi è una rastrelliera in cui vengono alloggiare le lunghezze di aste ogni volta che vengono estratte dal pozzo.

5.5.3 Il cavo

Attraverso il cavo il peso da sollevare è collegato all'argano.

Esso è composto da più trefoli avvolti attorno ad un'anima centrale, e a loro volta costituiti da numerosi fili di acciaio al carbonio ad alta resistenza avvolti tra loro.

L'anima può essere o un cavo d'acciaio, o una corda di fibra o plastica; quella in acciaio conferisce al cavo una migliore resistenza allo schiacciamento, l'altra una maggiore flessibilità.

Oltre che per il tipo di anima, un cavo viene distinto per il numero di trefoli costituenti e per il numero di fili in ogni trefolo, nonché per il senso di avvolgimento dei trefoli stessi concorde od opposto a quello dei fili che li compongono.

Una estremità del cavo, detta linea veloce, si avvolge sul tornello dell'argano; l'altra, detta linea morta, è ancorata ad un elemento della sottostruttura e dopo di esso la parte restante è avvolta su un tamburo, come cavo di riserva.

L'elemento di ancoraggio consiste di una puleggia su cui il cavo compie due o tre giri prima di essere fissato con un morsetto ad un braccio solidale alla puleggia stessa. Al variare del tiro evidentemente la puleggia tende a

ruotare, ma ciò viene impedito da un dispositivo di vincolo cui è collegato il trasformatore idraulico, che invece trasforma la forza di rotazione in variazione di pressione.

Esse sono misurate da un manometro, posto vicino al perforatore, la cui scala fornisce direttamente il peso al gancio, in migliaia di libbre o in tonnellate. Dal nome del costruttore questo dispositivo è chiamato "Martin Decker".

Importante è osservare che, essendo il tratto di cavo compreso tra le due taglie quello più sollecitato, periodicamente, dopo un tempo di esercizio prestabilito, occorre sostituire questo tratto interessato.

5.5.4 Le taglie ed il gancio

In cima alla torre è posizionata la taglia fissa, che sostiene il carico massimo applicato al gancio, il tiro del capo fisso e del capo mobile.

E' costituita da un insieme di carrucole rotanti su cuscinetti a sfere o rulli attorno ad un perno di acciaio appoggiato a due robuste travi metalliche.

Le carrucole sono in acciaio speciale al manganese per il corpo, al cromo molibdeno per la gola. La gola ha sezione a 'V' con angolo al vertice di circa 30°, in modo da permettere al cavo un appoggio non inferiore ai 5/12 del suo perimetro.

La taglia mobile è analogamente costituita da un insieme di carrucole coassiali, su cuscinetti, separate da piastre verticali, cui è collegato il gancio.

La taglia fissa e mobile riducono lo sforzo nei confronti dell'argano per mezzo del numero di rinvii del cavo nel loro collegamento (si possono avere 8-10-12 corde).

In condizioni statiche si ha:

$$Z_t = \frac{Z_c}{C}$$

ove:

- Z_t è il peso agente su ogni carrucola della taglia mobile, in t;
- Z_c è il peso sostenuto dalla taglia mobile, in t;
- C è il numero delle carrucole della taglia mobile.

Alla taglia mobile è collegato, attraverso un mollone cilindrico ammortizzatore, il gancio vero e proprio, libero di ruotare attorno ad un asse verticale.

Il numero di pulegge delle taglie attraverso cui rinviare il cavo viene scelto in base alla forza di tiro che si vuole poter applicare al gancio e alla

velocità di sollevamento che ne deriva e che le è inversamente proporzionale.

5.6 Gli organi rotanti

Essi comprendono la tavola rotary, la testa di iniezione, l'asta motrice, la batteria di aste e gli scalpelli.

5.6.1 La tavola rotary

Consiste essenzialmente di una piattaforma girevole in apposita struttura recante inferiormente una corona dentata su cui ingrana un pignone azionato dal gruppo motore.

Nel foro centrale della tavola è posizionato il *master bushing*, attraverso il quale la *rotary* trasmette il movimento al *kelly drive bushing* (parte della t.r. solidale alla batteria di aste) e come conseguenza alla batteria stessa.

Oltre alla funzione fondamentale di far ruotare la batteria, e quindi l'organo di scavo, la tavola rotary ha anche quella di sopportare il peso della batteria o del casing durante quelle fasi dalle manovre di introduzione o estrazione di essi in cui non possono venire sostenuti dall'argano, e le vengono allora vincolati per mezzo di *slips* (cunei).

La velocità di rotazione della piattaforma va da un minimo di 20 r.p.m. durante operazioni di taglio di tubi, ad un massimo, durante la perforazione, di 200 - 300 r.p.m.

Le specifiche tecniche della tavola rotary riguardano le dimensioni del foro della piattaforma e il carico che essa può sostenere sia in condizioni statiche che dinamiche.

5.6.2 La testa di iniezione

Detta anche *swivel*, è l'elemento che fa da tramite tra il gancio della taglia mobile e la batteria di aste. Attraverso di essa scorre inoltre il fango che viene inviato, tramite le aste, nel pozzo.

La testa di iniezione deve pertanto poter sostenere il peso della batteria di aste, consentirne la rotazione, ed essere a tenuta nei confronti del fango.

Consiste di un corpo fisso, a coppa, sospeso al gancio, e recante il collo d'oca per il collegamento al circuito del fango.

E' attraversata da uno stelo rotante, collegato all'asta quadra, e poggiante con una espansione a fungo su un cuscinetto portante. Un'apposita guarnizione assicura la tenuta del fango.

5.6.3 Asta motrice e batteria di aste

L'asta motrice, o *kelly*, è un elemento tubolare a sezione quadrata od esagonale, con spigoli arrotondati per evitare la concentrazione di tensioni torsionali, appeso alla testa d'iniezione e che, in virtù della propria forma, si impegna nella *kelly drive bushing* (parte della tavola *rotary*) e, conservando la possibilità di scorrere verticalmente, viene posto in rotazione, trasmettendo il moto alla sottostante batteria.

Le altre aste della batteria hanno invece sezione circolare e si distinguono in normali e pesanti.

La differenza nei due tipi è nello spessore della parete e, di conseguenza, nel peso; le aste pesanti vengono montate, in numero opportuno, subito al di sopra dello scalpello e gli conferiscono la desiderata spinta assiale oltrechè agire da volano contro gli impuntamenti e migliorare la verticalità del foro con la loro maggiore rigidità.

Tutte le aste sono collegate tra loro rigidamente mediante avvitanamento a tenuta idraulica in modo da non avere dispersioni di energia nella trasmissione del moto allo scalpello, né perdite di fango di circolazione.

Il collegamento rigido viene ottenuto con giunti a filettatura conica, realizzati secondo standards diversi, tre dei quali, accettati dall'A.P.I. sono: *Regular* (Reg), *Full Hole* (F.H.), *Internal Flush* (I.F.), il più diffuso.

Ad ogni standard compete un diverso profilo interno del giunto e quindi, in definitiva, un diverso valore delle perdite di carico nella circolazione del fango.

Tra le caratteristiche importanti di una batteria di aste sono il suo peso totale entro il fango, l'allungamento che essa subisce per le variazioni di temperatura e lo stato tensionale e la sua resistenza agli sforzi torsionali.

Il peso totale nel fango di una batteria di aste tra loro uguali è dato da:

$$W_p = \frac{WL}{P_a} (P_a - P_f)$$

ove:

W_p = peso delle aste nel pozzo pieno di fango - Kg -

P_a = peso specifico dell'acciaio - Kg/m³ -

P_f = peso specifico del fango - Kg/m³ -

W = peso lineare delle aste - Kg/m -

L = lunghezza della batteria - m -

La variazione di lunghezza con la temperatura può venire espressa con la usuale formula della dilatazione termica lineare e quella dovuta agli stati tensionali applicando la legge della elasticità di Hooke, tenendo presente che tendono a produrre allungamento della batteria il suo peso proprio e la compressione prodotta dal fango sulla sua superficie ed a produrre accorciamento la spinta di galleggiamento del fango e quella dovuta all'appoggio a fondo pozzo.

5.6.4 Gli scalpelli

Sono gli organi di scavo veri e propri. I tipi più comunemente utilizzati sono due, operanti su principi differenti: gli scalpelli a rulli e gli scalpelli diamantati. Ultimamente sono stati studiati e sono in fase di utilizzo dei nuovi tipi di scalpello chiamati PDC (*polycrystalline diamone compact*).

Gli scalpelli a rulli (*roller cone*) hanno da due a quattro, più frequentemente tre, coni dentati di acciaio duro che durante la rotazione dello scalpello rotolano sul fondo del pozzo, anche con un certo strisciamento, frantumando la roccia.

Tali coni possono avere i denti, ottenuti per fresatura, di diverse dimensioni a seconda del terreno per il quale sono ottimizzati oppure, per eliminare gli inconvenienti provocati dalla normale usura, possono avere dei denti costituiti da inserti di carburo di tungsteno (TCI: *tungsten carbide insert*).

Inizialmente questi ultimi erano destinati solo alla perforazione di formazioni estremamente dure ed abrasive, ma in seguito ai benefici di durata riscontrati, sono stati creati dei modelli adatti anche a formazioni più tenere. I TCI costano circa 5 volte più dei normali scalpelli a denti fresati, ma consentono un lavoro proporzionalmente maggiore.

Molti tipi di scalpelli a rulli sono sensibilmente aiutati nell'azione di scavo dal particolare disegno degli ugelli (dusi) di uscita del fango (scalpelli a getto), che imprimono a questo un'alta velocità di uscita diretta ai lati ed alla base di ogni cono, sicché i detriti vengono prontamente allentati e rimossi.

Gli scalpelli diamantati invece non hanno parti in movimento, ma nelle loro superfici frontali e laterali sono inglobati numerosi diamanti industriali che abradono la roccia durante la rotazione. Naturalmente anche essi sono provvisti di luci di uscita del fango.

Gli scalpelli PDC, provati per la prima volta nel 1973, hanno subito una certa evoluzione sino ad arrivare ad un prodotto in grado di ridurre il costo per metro perforato.

Gli attuali PDC, impiegabili economicamente in formazioni da tenere a medie, sono da considerare una rielaborazione altamente tecnologica dei vecchi scalpelli a lame (i primi utilizzati nell'industria petrolifera).

Si tratta in sostanza di un utensile monolitico che non ha parti in movimento reciproco e che utilizza delle pastiglie di carburo di tungsteno e diamante sintetico per l'asportazione di un piccolo truciolo di roccia con un meccanismo molto efficace e che richiede una quantità di energia minore rispetto alla rottura per compressione.

5.7 Il circuito del fango

Fanno parte del circuito del fango: le pompe di mandata, il manifold, le condotte di superficie, rigide e flessibili, la testa di iniezione, la batteria di perforazione, l'intercapedine tra le aste, il vibrovaglio, le vasche del fango ed il vascone rifiuti.

5.7.1 Le pompe

Le pompe forniscono al fango l'energia necessaria a vincere le perdite di carico nel circuito e a circolarvi a velocità opportuna, nonché a favorire il distacco dei detriti allentati dallo scalpello.

Esse sono usualmente di tipo alternativo a doppio effetto, a due (duplex) o tre pistoni (triplex).

Ricevono energia dal motore attraverso cinghie trapezoidali, e ne trasformano il moto da rotativo a rettilineo alternativo con un sistema biella - manovella.

Il moto rettilineo alternativo del pistone produce nelle camere del cilindro compressioni e depressioni cicliche che, con l'ausilio di valvole, spingono in circolazione il fango.

Le camicie (e di conseguenza i pistoni) sono intercambiabili, in modo da poter variare portata e prevalenza; i diametri vanno da 1" 1/2 a 7" 1/2.

A causa del funzionamento alternativo la portata è pulsante, e così la pressione alla mandata: questo fenomeno è più vistoso nelle pompe duplex, che danno 4 colpi di pressione per ogni ciclo, rispetto alle triplex, che ne danno 6.

Queste oscillazioni di portata e di pressione sono deleterie per la durata delle condutture del fango e per l'efficienza della pompa: si installa perciò sulla tubazione di mandata il *dampener*, ammortizzatore paragonabile ad una molla pneumatica, che assorbe energia alla mandata e la restituisce nella fase di quiete, livellando così la curva pressione - tempo.

La portata di una pompa è funzione del numero di colpi nell'unità di tempo, della corsa e dell'alesaggio, nonché del calibro degli steli e del rendimento volumetrico, variabile tra 0.85 e 0.95 .

Si ha:

$$Q = 0.515\eta nL \left(D^2 - \frac{d^2}{2} \right) \quad \text{per le duplex}$$

$$Q = 0.7725\eta nL \left(D^2 - \frac{d^2}{2} \right) \quad \text{per le triplex}$$

ove:

Q = portata - l/min -

n = numero di colpi nel minuto primo

L = corsa - inch -

D = diametro camicia - inches -

d = diametro stelo - inches -

η = rendimento volumetrico

La portata va scelta in funzione dell'*annulus*, l'intercapedine tra aste e foro: infatti la conseguente velocità di risalita del fango in detto *annulus* deve essere tale da consentire il trasporto a giorno dei detriti di scavo: un sufficiente trasporto si ottiene con velocità tra i 30 ed i 60 m/min.

La velocità può essere calcolata con:

$$V = \frac{Q}{D_f^2 - D_e^2} \cdot 1.97$$

ove:

V = velocità di risalita del fango nell'*annulus* - m/min -

Q = portata - l/min -

D_f = diametro foro - inch -

D_e = diametro esterno delle aste - inch -

5.7.2 Condotte di superficie - Manifold - Vasche

Le condotte di superficie, assieme ad un complesso di valvole posto a valle delle pompe (il manifold di sonda), consentono di distribuire il fango alle aste, o al colmataggio, o ad altre utenze (eiettore, mescolatori, etc.), o di convogliarlo in circuito chiuso escludendone l'immissione nel pozzo, quando lo richiedono le operazioni in corso.

Nel circuito sono inoltre inserite diverse vasche, alcune delle quali contengono una riserva di fango pari almeno alla metà del volume del foro, per fronteggiare improvvise necessità derivanti da perdite di circolazione per assorbimento del pozzo, altre con fango "pesante" per contrastare eventuali manifestazioni improvvise nel pozzo.

5.7.3 Vibrovaglio

Questa apparecchiatura, disposta all'uscita del fango dal pozzo, separa il fango stesso dai detriti di perforazione: questi ultimi vengono accumulati nel vascone dei rifiuti, che, negli impianti a terra, sovente è uno scavo nel terreno rivestito da un telo impermeabile.

L'apertura della rete del vibrovaglio è generalmente tra 10 e 100 mesh, la pendenza tra i 15°

e i 30° e la frequenza di vibrazione tra i 1000 e i 3000 cicli al minuto primo.

5.7.4 Altre apparecchiature

Oltre agli elementi del circuito del fango descritti in altri paragrafi perchè comuni a più funzioni (aste, testa di iniezione), vi sono alcuni apparecchi accessori della circolazione.

Tra questi vi sono la tramoggia per l'introduzione in circuito degli additivi solidi del fango e gli agitatori per uniformare il composto.

Quando si perforano formazioni sabbiose o siltose è inoltre necessario impiegare "*desander*" e "*desilter*" per la rimozione dei detriti di perforazione dal fango, per i quali il vibrovaglio sarebbe inefficace.

L'eventuale gas presente nelle formazioni perforate e che potrebbe essere risalito col fango, viene eliminato invece con un "*degasser*"; questo perchè ricircolare tale gas potrebbe portare ad un alleggerimento progressivo del fango sino ad arrivare all'eruzione del pozzo.

5.8 Fanghi di perforazione

I fanghi, che sarebbe più opportuno chiamare fluidi di perforazione, hanno una notevolissima importanza dato che contemporaneamente debbono assolvere a più funzioni:

- Asportazione dei detriti da fondo pozzo, sfruttando la propria viscosità e densità.
- Raffreddamento e lubrificazione dello scalpello.
- Contenimento dei fluidi presenti nelle formazioni perforate, ad opera della pressione idrostatica.
- Consolidamento della parete del pozzo e riduzione dell'infiltrazione di acqua attraverso la stessa, per formazione del pannello.
- Riduzione del logorio degli attrezzi e dell'impianto dovuta all'apparente diminuzione di peso della batteria per effetto della spinta di galleggiamento.
- Mantenimento in sospensione dei detriti e loro trasporto in superficie.

I fanghi sono normalmente costituiti da una fase liquida, generalmente acqua, e da una fase colloidale in essa dispersa.

La fase colloidale ha il compito di impartire al fluido le caratteristiche fisiche più adatte per svolgere le funzioni precedentemente descritte; ciò si ottiene con l'impiego di prodotti che agiscono come viscosizzanti o come appesantenti.

I primi, rappresentati da speciali argille, forniscono al fango la viscosità che gli permette di mantenere in sospensione i materiali di appesantimento e i detriti, anche a circolazione ferma, con la formazione di geli, e la facoltà di lubrificare gli organi in movimento; inoltre servono a formare il pannello di ricoprimento sulla parete del pozzo.

Tra queste argille sono la bentonite e la attapulgit.

Gli appesantenti servono a dare al fango la densità opportuna per realizzare un agevole trasporto a giorno dei detriti e per controbilanciare col carico idrostatico ingressi di fluidi in pozzo: tra essi è di impiego generalizzato la barite, ma si usano anche calcite o galena.

In determinati casi all'acqua si sostituisce una emulsione di acqua in olio: si realizzano così i fanghi a base oleosa, il cui impiego è opportuno nell'attraversamento di formazioni costituite da argille rigonfianti che a contatto di acqua potrebbero far rischiare prese di batteria.

Infine, in presenza di poca o nulla acqua di formazione e sussistendo i problemi di perdite di circolazione, si può perforare addirittura con sola aria o con fanghi aerati o a schiuma (*stiff-foam*); in tutti questi casi le attrezzature metalliche vengono protette dall'ossidazione con l'aggiunta di anticorrosivi.

Per svolgere contemporaneamente e soddisfacentemente tutte le suddette

funzioni, i fluidi di perforazione richiedono continui interventi e controlli

delle loro caratteristiche da parte degli operatori: è questo il compito del fanghista.

5.9 Organi di sicurezza

Abbiamo già visto che è compito del fango contrastare con la pressione dovuta alla sua densità l'ingresso di fluidi di strato nel foro.

Perché ciò avvenga, naturalmente, la pressione esercitata dal fango deve essere sempre superiore o uguale a quella di strato. Può però accadere di incontrare zone in sovrappressione, cioè con fluidi che per ragioni tettoniche o morfologiche hanno pressione superiore a quella che competerebbe loro per il solo gradiente idrostatico. Può anche accadere che una rapida manovra di sollevamento in pozzo di organi di dimensioni prossime alla sezione di questo provochi un pistonaggio del fango con conseguente diminuzione della pressione rispetto a quella che esso esercita normalmente.

In questi casi può aversi un ingresso dei fluidi di strato nel pozzo, ed avendo essi densità inferiore al fango, ne consegue una loro risalita verso la superficie.

Effetto di ciò può essere un alleggerimento del fango, ormai frammisto ai fluidi, o un suo spiazzamento: entrambi i fenomeni hanno un effetto destabilizzante che ne favorisce la prosecuzione e amplificazione, sino a divenire inarrestabili e degenerare in eruzione (*blow-out*) del pozzo.

La fase ora descritta, preludio all'eruzione, è detta "*kick*"; si riconosce inequivocabilmente dall'apparente aumento di volume del fango nelle vasche: in questo periodo è ancora possibile intervenire prima che si manifesti il *blow-out* utilizzando fango alla massima densità richiesta; quando invece la fuoriuscita dalla bocca-pozzo di fango, fluidi di strato, eventuali

materiali incoerenti, risulta incontrollabile può assumere aspetti catastrofici, specie se aggravata da incendi.

A prevenire appunto le eruzioni, quando il fango da solo non è più in grado di contrastarle, servono alcune apparecchiature di sicurezza che vengono montate sulla testa del pozzo.

Esse il nome di "*blow-out preventers*" (B.O.P.) e comunque siano realizzate la loro azione è sempre quella di chiudere ermeticamente la bocca-pozzo, sia questa libera che attraversata da attrezzature (aste, casing, etc.).

Vi sono due tipi fondamentali di B.O.P.:

Il B.O.P. anulare, o a sacco, per la forma dell'organo di chiusura, è montato superiormente a tutti gli altri. Esso dispone di un organo in gomma di forma toroidale che sollecitato idraulicamente in senso assiale si deforma, facendo di conseguenza diminuire il diametro del foro interno e potendo così fare tenuta attorno a qualsiasi elemento si trovi nel pozzo. Nel caso di pozzo sgombero, il B.O.P. anulare assicura sempre una certa tenuta, però la guarnizione in gomma tende più facilmente a danneggiarsi.

Un altro tipo di B.O.P. è quello a ganasce: dispone di due saracinesche prismatiche che con azionamento idraulico o manuale possono essere serrate tra loro. Evidentemente quando in pozzo sono presenti attrezzature, le ganasce devono essere sagomate in modo da fornire loro un alloggio, e di conseguenza a seconda di ciò che si ha in pozzo al momento (aste, casing di differente diametro), occorre montare le ganasce opportune.

Ganasce cieche invece chiudono a pozzo libero, ma sono in grado, in caso di emergenza, anche di tranciare quanto si trovasse tra di esse all'atto della chiusura.

Questi B.O.P. vengono usualmente utilizzati come seconda possibilità, quando l'intervento del *preventer* a sacco si fosse dimostrato inefficace.

Naturalmente affinché una volta chiuso l'*annulus* per mezzo del *preventer* non si abbia risalita attraverso le aste, sulla *kelly* sono disposte valvole di arresto (*kelly cock*).

In tutti i casi di "*kick*", una volta chiuso il pozzo col *preventer*, si deve prontamente manovrare per ripristinare le condizioni di normalità lasciando fuoriuscire a giorno il fluido entrato e ricondizionando il pozzo con fango di densità adatta alla situazione.

A questo scopo si hanno a disposizione a bocca pozzo due linee dotate di valvole di intercettazione. Attraverso la linea "*choke*", che dispone di una valvola la cui apertura può essere variata a piacere con continuità, si permette al "*kick*" di giungere in superficie, circolando contemporaneamente il nuovo fango attraverso l'altra linea, la "*kill*", (o attraverso

le aste, se sono in pozzo), in maniera tale che il "*kick*" si esaurisca senza che nuovo fluido faccia il suo ingresso in pozzo.

Queste due linee sono facilmente riconoscibili in quanto la "*choke*" ha generalmente diametro maggiore della "*kill*".

Generalmente un gruppo (stack) di B.O.P. è composto, partendo dall'alto, da:

- B.O.P. a sacco (Hydrill);
- B.O.P. a ganasce sagomate;
- B.O.P. a ganasce cieche;
- B.O.P. a ganasce sagomate.

L'ordine dei B.O.P. a ganasce può essere anche variato.

Importante è notare che ogni qualvolta è posizionato uno stack di B.O.P. viene effettuato un test di tenuta su tutte le linee e sui *preventer* stessi.

Questi tests, effettuati con pressioni opportune, sono fatti utilizzando generalmente acqua (in pressione) ed un particolare strumento a coppa (cup tester) calato nel pozzo con le aste di perforazione. .

Tale strumento viene posizionato qualche metro sotto lo "stack" dei B.O.P. ed ha lo scopo di evitare che la pressione di prova si scarichi a fondo pozzo, causando eventuali fratturazioni, e che invece risalga verso l'alto. Questi tests vengono poi comunque effettuati con una frequenza settimanale essendo molto importante ai fini della sicurezza la buona affidabilità

dei *preventer* stessi.

5.10 La testa pozzo

La testa pozzo è una struttura fissa generalmente saldata od imbullonata al primo "*casing*" (*surface casing*).

Gli impianti di perforazione a terra, i *jack-up* ed alcune piattaforme fisse utilizzano teste pozzo molto simili tra loro, mentre gli impianti

semisommergibili e le *drilling-ships* utilizzano teste pozzo più complesse, posizionate sul fondo marino.

5.10.1 La testa pozzo per impianti a terra

La testa pozzo a terra consiste essenzialmente in una serie di inflangiate di diametro decrescente, che realizzano il collegamento tra il *casing* e gli organi di controllo e sicurezza del pozzo (B.O.P.).

La successione delle operazioni di costruzione della testa pozzo a terra si può così brevemente descrivere:

il primo passo è quello di saldare al *casing* di superficie la "flangia base" con diametro uguale a quello dei B.O.P.

Procedendo nella perforazione e nel tubaggio del pozzo, i *casings* successivi vengono via via incuneati all'interno delle flange corrispondenti precedentemente connesse tramite bulloni o clampe alla flangia base.

Il collegamento superiore con l'insieme dei B.O.P. è realizzato con delle riduzioni (*spools*) che riconducono il diametro decrescente della testa pozzo a quello della stack di B.O.P. inizialmente utilizzato.

5.10.2 La testa pozzo sottomarina

Le teste pozzo sottomarine si differenziano da quelle a terra sia per le maggiori difficoltà operative che comporta il loro posizionamento, sia per il maggior numero di funzioni che sono chiamate ad assolvere.

Per queste attrezzature è necessaria soprattutto una notevole semplicità accompagnata ad una buona robustezza ed affidabilità.

I principali requisiti richiesti ad una testa pozzo sottomarina possono essere riassunti nei seguenti:

- costituire una base resistente sul fondo marino con un sistema di guida per l'inizio perforazione e l'imbocco di tutte le attrezzature necessarie in seguito;
- garantire nel contempo un complesso in grado di ricevere le colonne di rivestimento, assicurando tra di esse una tenuta idraulica.

Elementi che compongono le teste pozzo sottomarine sono:

- Base guida temporanea (*Temporary guide base*);
- Base guida permanente (*Permanent guide base*).

5.10.3 La base guida temporanea

E' generalmente la prima attrezzatura che viene calata in mare col duplice scopo di fornire una base di appoggio sul fondo ed un ancoraggio per le linee di guida (*guide lines*) costituite da due o quattro cavi d'acciaio che servono a guidare nel pozzo le prime attrezzature di perforazione.

La struttura in acciaio è concepita per essere appesantita una volta posizionata e per essere calata insieme alle aste di perforazione per mezzo di un "attrezzo di discesa" (*running tool*) svincolabile dalle aste.

A giorno viene collegata al *running tool* ed alle *guide lines*, dopodiché calata sul fondo; .

una volta che è stata posizionata e le *guide lines* pensionate per mezzo di argani ad aria,

viene disinserito il *running tool* e recuperato a bordo. Per facilitare lo svincolo del *running*

tool, specialmente in presenza di fondali non piani, talvolta sopra l'utensile viene inserito

uno snodo sferico.

Importante comunque è il fatto che la T.G.B. una volta posizionata deve avere una giacitura il più possibile orizzontale.

I tensionatori delle *guide lines* sono progettati in modo da avere una sufficiente prontezza nel riprendere eventuali variazioni di tensione che si potrebbero verificare.

5.10.4 La base guida permanente

E' la struttura portante di guida permanente che viene installata dopo la T.G.B. ed è discesa insieme al tubo guida (*conductor pipe*).⁶

Questa apparecchiatura è realizzata con profilati di acciaio e porta quattro piantoni tubolari (*posts*) vincolati alle linee guida, utilizzati per il posizionamento della testa pozzo e dei B.O.P.

Nella parte superiore dei "*posts*" è installato un meccanismo di bloccaggio dei cavi che permette il recupero degli stessi (disinserendosi ad un determinato tiro) per mezzo di una particolare attrezzatura per la sostituzione delle linee guida (*guide line replacement tool*).

⁶ Il tubo guida (*conductor pipe*) è una tubazione formata da elementi saldati o accoppiati tramite giunti filettati, di lunghezza variabile in funzione della profondità d'acqua, che ha lo scopo di sostenere le prime formazioni perforate.

Tale linea è collegata alla P.G.B. per mezzo del primo alloggiamento (*housing*), il quale tra l'altro fornisce anche l'alloggiamento per lo "*housing*" successivo.

Nella parte inferiore della P.G.B. è applicato un elemento sferico (bottom gimbal) che appoggiandosi alla sezione ad imbuto della T.G.B. permette alla struttura di posizionarsi orizzontalmente.

5.10.5 Sistemi di inizio pozzo

Attualmente vi sono tre sistemi per iniziare un pozzo con teste pozzo sottomarine:

A - Appoggiare la T.G.B. sul fondo e perforare un foro adatto ad alloggiare e cementare un *conductor pipe* munito all'estremità superiore di P.G.B. che si appoggerà sulla T.G.B.

È un sistema particolarmente usato per fondali consistenti (coralli, sabbia compatta, etc.).

Una volta posizionata la T.G.B. viene disceso lo scalpello che può essere guidato da una opportuna struttura di guida (*bit guide shoe*) per centrarlo; normalmente lo scalpello è seguito da un allargatore e come fluido di circolazione si utilizza acqua di mare a perdere.

Quando il pozzo è pronto per ricevere il *conductor pipe*, viene ritirato lo scalpello.

Il primo tubo dovrà essere munito di scarpa di cementazione, mentre l'ultimo sarà collegato all'*housing* alloggiato a sua volta nella apposita sede della P.G.B.

All'estremità delle aste viene inserito un opportuno *running tool* da vincolare all'*housing* ed il tutto, utilizzando le *guide lines*, è adagiato sul fondo permettendo alla P.G.B. di appoggiarsi alla T.G.B.

A questo punto per rendere il tutto fisso, occorre procedere alla cementazione del *conductor pipe*.

In generale, per far ciò viene posizionato sulla batteria di aste un centralizzatore per permetterne un sicuro posizionamento, dopo di che viene pompato direttamente il cemento.

B - Infiggere nel suolo, utilizzando il sistema a getto (*jetting system*) con il solo ausilio del peso e delle pompe dell'impianto, il *conductor pipe* munito dell'*housing* e collegato alla P.G.B., per una profondità opportuna.

Questo metodo ovviamente è valido solo per quei fondali che rendono possibile ciò e permette di evitare l'uso della *Temporary Guide Base*. Per effettuare questa operazione occorre fare delle prove di penetrabilità che indicheranno anche le dimensioni opportune da usare per il *conductor pipe*.

Per favorire la penetrabilità l'estremità del c.p. è tagliente ed i giunti sono saldati, in modo da assicurare un profilo esterno continuo.

Il *conductor pipe* viene fissato all'*housing*, il quale è a sua volta solidale con la parte interna della P.G.B.; all'interno della tubazione vengono posizionate le aste di perforazione, con all'estremità una testina di cementazione (*jetting head*) sopra la quale vi è un centralizzatore e un opportuno numero di aste pesanti (*drill collar*). Le parti, collegate per mezzo del *running tool* vengono calate in pozzo, circolando attraverso la *jetting head* con lo scopo di facilitare la rimozione del materiale dalla condotta.

C - Posizionare il casing perforando contemporaneamente, con il metodo AZ; tale metodo può essere utilizzato sia in formazioni tenere che dure, ma viene comunque impiegato molto raramente.

L'attrezzatura è costituita da due parti fondamentali:

1) la batteria interna contenente tutto quanto necessario per la perforazione, centratura e successiva cementazione;

2) un assieme esterno comprendente il *conductor pipe*, la P.G.B., lo *housing* del *conductor pipe* ed una piastra di arresto (*stop plate*).

Inizialmente la P.G.B. è supportata dalle *guide lines*, dopo che sono stati perforati 7/10 metri viene però adagiato sul fondo.

Saldata vicino all'estremità superiore de *conductor pipe* c'è la piastra di arresto che, a fine perforazione, si appoggia alla P.G.B. e sostiene il *conductor pipe* sin tanto che non viene cementato.

Una volta completato il lavoro di cementazione, l'intera batteria può venire recuperata lasciando sul fondo il *conductor pipe* cementato e la P.G.B. in sede.

La caratteristica saliente di questo sistema è che tutte le operazioni si susseguono senza mai estrarre la batteria, una volta che tutta l'attrezzatura è stata calata contemporaneamente ad inizio lavoro.

Una volta posizionata la testa pozzo si procede alla perforazione vera e propria, posando, di volta in volta, a seconda delle necessità dei *casings* di diverso diametro, ognuno dei quali verrà sorretto dallo *housing* del *casing* precedente.

Le modalità di posizionamento sono sostanzialmente simili a quelle utilizzate per il *conductor pipe*: uso del *running tool* e cementazione successiva.

Per effettuare la circolazione a giorno dei fanghi di perforazione, si utilizza una tubazione apposita chiamata *riser* generalmente di diametro esterno 18" 3/4 o 16" 5/8 che collega la testa pozzo con il piano sonda.

5.11 La manovra di estrazione

La manovra di estrazione consiste nell'estrarre completamente la batteria di perforazione dal pozzo.

Tale operazione viene effettuata quando occorre posizionare il *casing*, sostituire lo scalpello o comunque ogni volta in cui necessiti avere il pozzo libero.

Dopo aver sollevato la batteria con l'argano, nel foro della tavola rotary vengono posizionati i cunei (*slips*) che impediscono alle aste di cadere nel pozzo quando non sono più trattenute dalla taglia; successivamente l'asta motrice con la testa di iniezione ed il *kelly bushing* viene sganciata e sistemata in un alloggiamento ricavato nel piano sonda (*rathole*).

Al gancio rimangono però sempre fissati per mezzo di staffe gli elevatori, cioè dei ganci che possono venire serrati sulle aste di perforazione permettendo, dopo che siano stati rimossi i cunei, di sollevare la rimanente parte di batteria; a questo punto, dopo aver riposizionato i cunei, si può procedere allo smontaggio delle aste estratte ed alla loro collocazione in apposite rastrelliere nella torre.

Generalmente le aste non vengono rimosse singolarmente ma a gruppi di tre, nominando questi raggruppamenti come lunghezze.

Naturalmente la sequenza delle operazioni viene ripetuta sin tanto che lo scalpello non viene riportato a giorno.

5.12 La manovra di discesa

Questa operazione consiste nella ripresa della perforazione di un pozzo ridiscendendovi la batteria.

A questo scopo, in modo analogo ma con ordine inverso a quanto viene fatto durante la manovra di estrazione, le varie lunghezze sono riprese dalla rastrelliera nella quale erano state posizionate ed avvitate in progressione sino a raggiungere la quota utile; nel caso in cui debbano venire inserite aste singole, queste vengono prelevate dal deposito e posizionate, una alla volta, nel *mousehole* (foro nel piano sonda al pari del *rathole*) da dove vengono poi estratte ed avvitate alla batteria.

Per effettuare il riavvitamento possono essere usati degli avvitatori ad aria compressa.

Per garantire la tenuta idraulica, prima di proseguire con la lunghezza successiva, le giunzioni vengono "strette" con appositi utensili dette chiavi di manovra (*tongs*) che si serrano attorno alle aste come tenaglie ed ai quali viene assicurato il " tiro" opportuno per mezzo di catene

collegate all'argano.

Durante l'avanzamento dei lavori di perforazione vengono effettuate delle operazioni di rivestimento del pozzo con la posa di tubazioni apposite

(*casings*), ad intervalli prestabiliti in funzione della profondità del pozzo e delle caratteristiche delle formazioni attraversate.

L'operazione di "tubaggio" viene eseguita vantaggiosamente con i seguenti scopi:

- Isolare, specie nel tratto iniziale del pozzo, formazioni non consolidate, poco compatte e friabili, che potrebbero sfaldarsi franando.
- Evitare perdite di circolazione per infiltrazione del fango nelle formazioni non rivestite, anche nell'eventuale presenza di un pannello fangoso alle pareti.
- Evitare la contaminazione del fango dovuta ai fluidi di formazione, dato che, specie a causa della depressione dovuta al pistonaggio in fase di estrazione della batteria, si possono avere fenomeni di diffusione di detti fluidi nel fango.
- Correggere le eventuali irregolarità di profilo ed imperfezioni del pozzo, come gli scavernamenti, evitando che portino ad un inutile aumento di volume dello stesso, nocivo in quanto aumenta la quantità di fango pesante necessario per intervenire in caso di pericolo.

Il diametro ed il tipo (di materiale, spessore, etc.) dei tubi utilizzati per queste operazioni variano secondo le caratteristiche del pozzo e la profondità da raggiungere; nella pratica i diametri più utilizzati sono: 20", 13" 3/8, 9" 5/8, 7".

Da notare che il 7" (o il 5", meno frequentemente) viene posato generalmente fino a fondo pozzo e viene utilizzato per l'eventuale messa in produzione.

I tubi di rivestimento vengono posati nel pozzo in modo analogo a quanto fatto con la batteria di perforazione, utilizzando quindi attrezzature simili ma con dimensioni maggiori, a causa del diametro maggiore.

Dato che il tubo di rivestimento viene successivamente cementato per fissarlo alle pareti del pozzo, accessorio indispensabile è la scarpa di cementazione, o *guide shoe*, un elemento di acciaio e cemento posizionato nella parte terminale dei tubi, che con il suo peso e la forma arrotondata aiuta la discesa degli stessi.

Un altro eventuale attrezzo utilizzato nel tubaggio è il collare di galleggiamento, o *float collar*, usato nella tecnica di cementazione "a tappo", un elemento inserito nella tubazione ad una certa altezza e dotato di una valvola che impedisce la risalita del fango o del cemento.

Altri accessori utilizzati sono i centralizzatori, o *centralizers*, e i raschiatori o baffi di gatto o *scratchers*.

I primi, costituiti da elementi a balestre longitudinali, hanno lo scopo principale di centrare la tubazione nel foro, facilitando la simmetria nella successiva operazione di cementazione; i secondi permettono, quando la tubazione viene ruotata o mossa verticalmente, di rimuovere le formazioni

prodotte dal fango di perforazione, facilitando la successiva presa del cemento sulla parete del pozzo.

5.13 La cementazione

L'operazione immediatamente seguente alla posa del *casing* è quella di cementazione della colonna stessa, operazione generalmente effettuata da una compagnia specializzata.

La miscela acqua-cemento pur dipendendo dalle caratteristiche morfologiche degli strati perforati è mantenuta comunque sempre molto fluida e per mezzo di pompe è inviata ad una valvola chiamata testa di cementazione (*cementing head*) posizionata alla sommità del *casing* sul piano sonda.

Nella cementazione nota come "con i tappi", piuttosto diffusa, prima dell'invio del cemento, nella tubazione, predisposta secondo lo schema della figura, viene rilasciato un tappo di gomma (*bottom plug*) il quale precede il cemento sino ad arrivare al *float collar* (collare di galleggiamento) dove viene trattenuto.

La pressione del cemento riesce ad aprire la valvola di non ritorno di cui è provvisto il collare permettendo al cemento stesso di riempire la parte inferiore della tubazione e di risalire nell'intercapedine tra la parte esterna del *casing* ed il foro.

Il pompaggio viene effettuato sin tanto che tutto lo spazio viene riempito dal cemento (la quantità di cemento viene preventivamente calcolata tenendo conto dei volumi richiesti); per terminare l'operazione dopo il cemento è inserito un altro tappo di gomma (*top plug*) simile al precedente ma più rigido e soprattutto non forabile.

Dopo questo viene pompato un fluido detto di spiazzamento, generalmente fango di perforazione, per spingere il cemento lungo la tubazione sino a che raggiunge il tappo di gomma inferiore (*bottom plug*).

Con questa operazione praticamente viene ripulito il *casing* da tutto il cemento rimasto; a questo punto il cemento rimane al di sotto del "collare di galleggiamento" mentre il resto della tubazione risulta piena del liquido utilizzato per lo spiazzamento.

Una volta terminata l'operazione di cementazione occorre attendere che il cemento si solidifichi (il tempo necessario viene definito come W.O.C. : *wait on cement*).

Dopo ciò ci si accerta che l'operazione sia stata eseguita correttamente, che il cemento avvolga perfettamente il *casing* e ne sostenga il peso effettuando nel contempo anche un'azione isolante per prevenire la tubazione da eventuale corrosione.

Esistono naturalmente altre tecniche di cementazione oltre a quella descritta, che possono essere utilizzate a seconda delle necessità e che comunque sostanzialmente rimangono sempre piuttosto simili tra loro.

5.14I cementi di perforazione

Il cemento Portland è il materiale normalmente impiegato in tutti i tipi di operazioni di cementazione che si effettuano nella perforazione dei pozzi.

Il cemento, impastato con acqua, forma una malta la cui consistenza dipende dal rapporto "acqua/cemento". L'acqua, a contatto con il cemento, dà luogo ad una serie di reazioni chimiche che provocano un progressivo rapprendimento ed indurimento della malta. Tale fenomeno è chiamato inizialmente presa, poi indurimento.

La presa avviene alcune ore dopo l'impasto, mentre l'indurimento ha inizio con la fine della presa e si prolunga nel tempo, anche per mesi.

Secondo le norme API, i cementi per perforazione sono suddivisi in varie classi, in funzione della profondità di impiego. Ogni classe contiene uno o più tipi di cemento: ordinario (O), a moderata resistenza chimica (MSR) e ad alta resistenza chimica (HSR) (resistenza ai solfati).

Le proprietà fisiche di una malta di cemento sono fortemente influenzate dalle condizioni di temperatura e pressione.

Nelle operazioni di perforazione si incontrano, come è noto, valori di temperatura e pressione crescenti con la profondità. Ne consegue che il tempo di presa di una malta, ad esempio, può essere sufficientemente lungo a una determinata profondità, ma troppo breve ad una profondità maggiore dove la temperatura e la pressione sono più alte.

Si pone quindi la necessità di aumentare o ritardare il tempo di presa della malta. Per ottenere ciò vengono usati degli additivi che danno luogo alle malte accelerate e ritardate.

Può, inoltre presentarsi la necessità di alleggerire o appesantire la malta e cioè di variarne la densità. Normalmente la malta viene appesantita in tutti quei casi in cui la densità del fango è sensibilmente maggiore di quella delle normali malte di cemento. La densità di una malta può essere aumentata o aggiungendo una sostanza avente densità maggiore di quella del cemento (ad esempio barite), o diminuendo il rapporto acqua/cemento. Nel secondo caso si possono ottenere malte pesanti fluide e pompabili sostituendo parte dell'acqua con additivi fluidificanti.

Per contro, la malta viene alleggerita quando è necessario avere una pressione idrostatica minore di quella di una malta di cemento puro, per impedire perdite di circolazione nelle formazioni e quando si esegue una cementazione in prossimità di strati a debole resistenza meccanica.

Per diminuire la densità della malta o si aumenta il rapporto acqua/cemento, o si aggiungono sostanze aventi densità minori del cemento (diatomite, bentonite, azoto, sfere di vetro).

Secondo le norme A.P.I. i cementi per perforazione sono suddivisi in varie classi (dalla "A" alla "H") a seconda delle caratteristiche chimico - fisiche.

La classe più comunemente utilizzata è la "G", che, senza l'aggiunta di additivi, può essere utilizzata sino a profondità di circa 2500 metri.

5.15 La squadra di perforazione

Sebbene il numero di persone che compone una squadra di perforazione vari da impianto ad impianto, generalmente una squadra che lavora in impianti a terra è composta da un caposquadra, un perforatore, un pontista e due o tre manovali; normalmente essa include anche un motorista, un meccanico ed un elettricista.

Nel caso di impianti "off-shore" l'impiego di personale è più vasto sia per la complessità delle operazioni che devono essere svolte, sia per provvedere alla richiesta di apparecchiature ed equipaggiamenti che devono essere forniti dalla base.

La direzione dell'impianto di perforazione è affidata al rappresentante della Committente (*company man*) il quale è responsabile di tutte le decisioni che riguardano la conduzione delle operazioni.

Il rappresentante della Contrattista (*tool pusher*) è il supervisore di tutte le operazioni di perforazione ed è la persona più importante della squadra di perforazione. Sotto la sua diretta sorveglianza, sul piano sonda, opera il perforatore (*driller*) che ha il controllo di tutti i macchinari di perforazione. Il pontista (*derrickman*) lavora su una piccola piattaforma posta sul derrick ad un'altezza di circa 30 metri ed ha il compito di indirizzare e guidare la parte superiore della batteria di aste di perforazione durante le manovre di discesa, estrazione e tubaggio; egli provvede inoltre a mantenere in perfetta efficienza i macchinari necessari

alla circolazione del fango.

I manovali (*floor-men*), guidati dal perforatore, effettuano tutte le operazioni sul piano sonda e provvedono inoltre ad avvitare e svitare i vari giunti di tubazioni da immettere o estrarre dal pozzo.

Al motorista, l'elettricista ed al meccanico spettano tutte le piccole riparazioni e gli interventi di manutenzione necessari al buon funzionamento dell'impianto.

6 Utensili di perforazione

Lo scalpello di perforazione è l'attrezzo che, montato all'estremità inferiore della batteria di perforazione, scava il foro riducendo la roccia in frammenti di piccole dimensioni (detti "cuttings") tali da poter essere rimossi dal fondo e portati a giorno dal fluido di perforazione. Quindi lo scalpello è uno degli strumenti di base della perforazione, per cui l'appropriata **scelta** dello stesso e dei parametri di utilizzo ha un'importanza rilevante.

6.1 Tipologie di scalpelli

Gli scalpelli di perforazione sono normalmente classificati in due categorie principali:

- "Rolling Cutter Bits"
- "Fixed Cutter Bits"

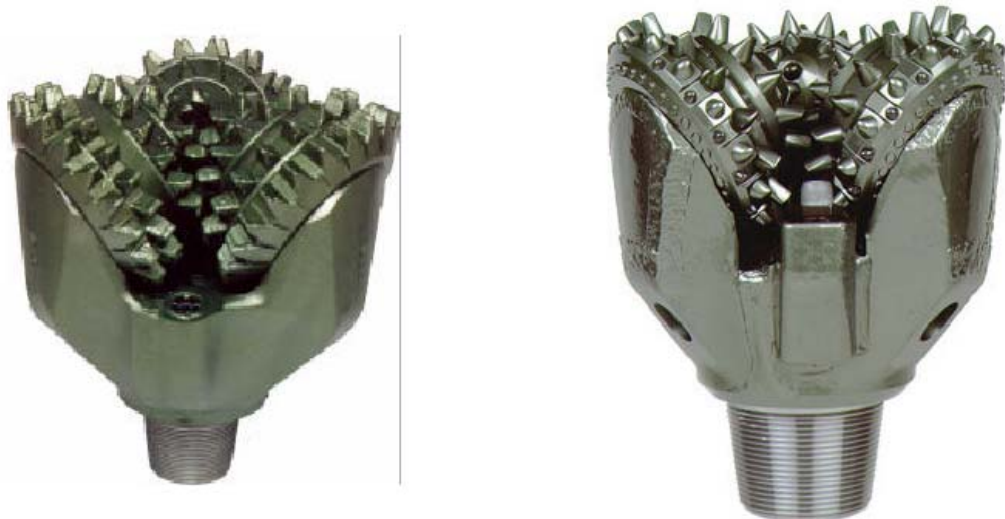


Figura 53 - "Rolling Cutter Bits"

6.1.1 "Rolling Cutter Bits"

I "Rolling Cutter Bits" (o "Scalpelli a Rulli o a Coni") sono normalmente formati da tre coni che ruotano mediante interposizione di cuscinetti, intorno ai loro assi mentre lo scalpello ruota sul fondo. La struttura

tagliante può essere rappresentata da “denti” (“**Tooth Bits**”) o da “inserti” (**Insert Bits**). In Figura 53 sono rappresentati esempi di “Rolling Cutter Bits”, mentre in Figura 54 ne sono mostrati i componenti principali.

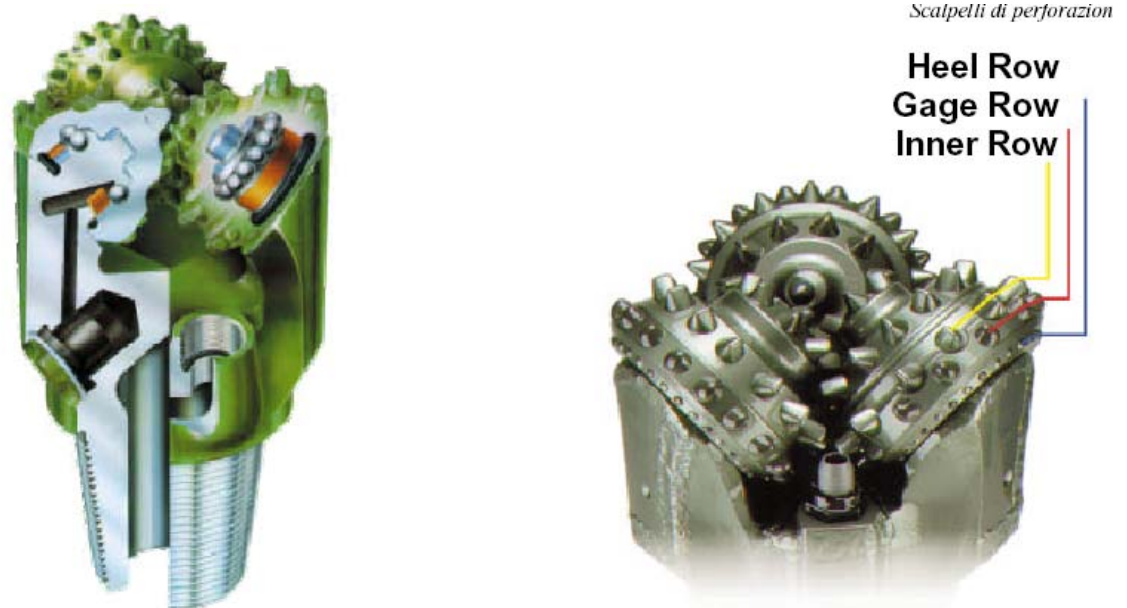


Figura 54– Componenti dei “Rolling Cutter Bits”

I termini fondamentali per il progetto di uno scalpello a rulli, che definiscono il diverso comportamento ed il diverso modo di lavorare, possono essere così definiti:

- **Eccentricità** degli assi di rotazione e **conicità** dei rulli;
- **Angolo** dell’asse del perno e dimensionamento del cuscinetto;
- **Numero dei denti o inserti** per rullo e loro altezza;
- **Protezione dall’usura** per abrasione dei denti o inserti e dei rulli;
- **Pesi e giri** applicabili;
- Influenza del fluido di perforazione ed **idraulica** dello scalpello.

6.1.1.1 *Eccentricità degli assi di rotazione e conicità dei rulli*

Lo scalpello lavora sul fondo ruotando attorno ad un asse che si chiama “**asse dello scalpello**”. Gli assi di rotazione dei coni convergono più o meno su questo asse a seconda del tipo di scalpello. La massima **convergenza** si ha con coni aventi taglienti corti per lavorare in terreni duri e la minima si ha con coni aventi taglienti lunghi per lavorare in terreni teneri. Il disassamento degli assi dei coni rispetto l’asse dello scalpello è denominato “**offset**” (Figura 55).

L’effetto dell’offset provoca un duplice lavoro dei taglienti che, oltre alla loro **infissione**, provocano lo “**svellimento**” laterale della roccia incisa.

I taglienti dei coni con accentuato offset sono applicabili in rocce tenere e poco abrasive; tali taglienti sono lunghi e radi. Con l'aumentare della durezza e dell'abrasività della roccia, l'offset dei coni diminuisce e con essa diminuisce l'altezza dei taglienti, che aumentano di numero.

L'offset è generalmente espresso come l'angolo di cui l'asse del cono dovrebbe essere ruotato per farlo passare per il centro del foro. L'offset può variare normalmente tra 4° , per scalpelli utilizzati in formazioni tenere, fino a zero, per formazioni dure ed abrasive. L'offset può anche essere espresso come distanza dell'asse del cono dal centro foro ed è misurato in frazioni di pollice.

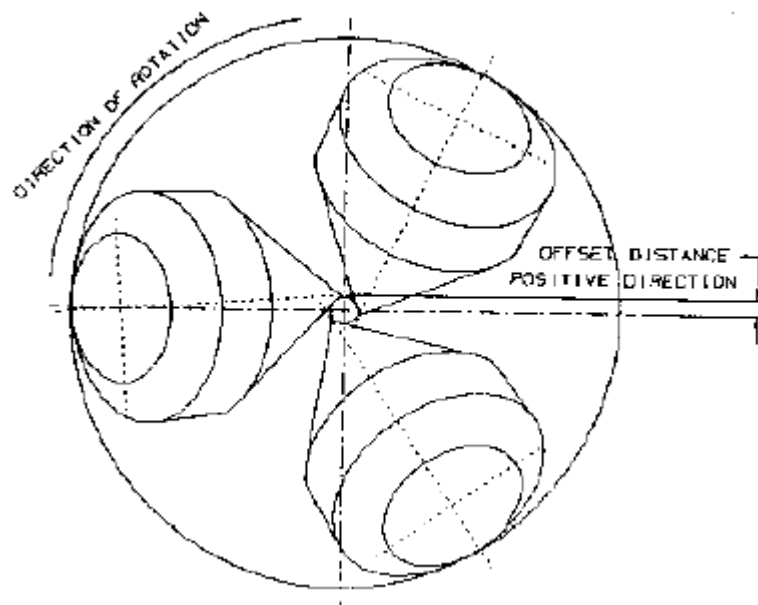


Figura 55 – “Offset”

6.1.1.2 Angolo dell'asse del perno e dimensionamento del cuscinetto

L'inclinazione del perno rispetto al piano orizzontale ha importanza per quanto riguarda il disegno del rullo e quindi del cuscinetto in esso contenuto. Esiste un altro angolo caratteristico del rullo chiamato “**Angolo di Oversize**”. Esso ha lo stesso effetto dell'angolo del perno per il **dimensionamento del rullo**. Infatti, se si vuole aumentare l'angolo del rullo a parità di diametro di scalpello, si dovrà aumentare o l'angolo del perno o quello di “oversize”, oppure ambedue contemporaneamente. Un diametro maggiore del rullo si ottiene anche riducendo l'altezza del tagliente. Il maggior diametro del rullo permette il contenimento di cuscini di maggior dimensione e quindi più resistenti, consentendo quindi l'applicazione di pesi più elevati sullo scalpello.

6.1.1.3 Cuscinetti e lubrificazione

I Cuscinetti (Bearings) interposti fra l'asse del cono ed il cono sono di due tipi:

- Cuscinetti a Rulli (“**Roller Bearings**”)

- Cuscinetti a Frizione (“**Friction o Journal Bearings**”)

Uno schema tipico di **Cuscinetto a Rulli** è riportato in figura 56. Una serie di rulli cilindrici è posizionata in una sede ricavata nella zona più ampia del cono e ha lo scopo di sopportare la maggior parte dei carichi a cui il rullo è sottoposto, permettendone la rotazione. E' il cuscinetto principale ed è quindi il primo che tenderà ad usurarsi. Una seconda serie di rulli è posizionata nella zona vicina al vertice del cono (“**nose**”) con lo scopo di sopportare una parte dei carichi assiali. Fra le due serie di rulli è interposto un cuscinetto a sfere che ha lo scopo di bloccare il cono sul perno, oltre a contribuire alla riduzione di attrito nel sistema.



Figura 56 – “Roller Bearings”

Dal punto di vista progettuale, occorre raggiungere il giusto compromesso tra numero e dimensioni dei rulli. Rulli di grande diametro sono sicuramente più robusti, ma solo un numero limitato potrà essere ospitato nella sede. Un numero limitato comporterà un maggior carico su ciascun rullo e quindi una maggiore possibilità di usura e, al limite, di rottura. I “**Friction o Journal Bearing Bits**” hanno come cuscinetto principale uno del tipo a frizione, ossia composto da due superfici cilindriche finemente levigate, ricavate una sul perno e l'altra sulla superficie del cono (Figura 57).

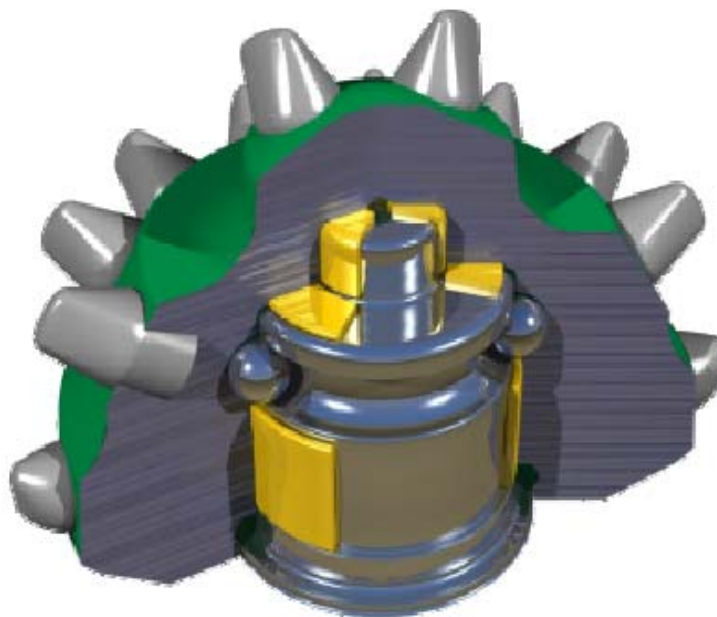


Figura 57 – “Friction Bearing”

Le due superfici, allo scopo di ridurre gli attriti e migliorare la trasmissione del calore, vengono normalmente ricoperte con argento o rame. In alcuni modelli viene mantenuto un cuscinetto a sfere con il compito di mantenere in sede il rullo. In altri modelli tale compito è svolto da un anello di ritegno o “**Retaining Ring**”. I cuscinetti a frizione hanno il vantaggio di avere un’ampia area di contatto attraverso la quale il peso sullo scalpello viene trasmesso al cono.

La **lubrificazione** del cuscinetto è un fattore essenziale per la vita dello stesso. I sistemi principali di lubrificazione sono due:

- “**Open Bearing**”
- “**Sealed Bearing**”

Negli “**Open Bearing**” la lubrificazione viene effettuata dal fluido stesso di perforazione. Data la probabile presenza in quest’ultimo di materiale abrasivo, questo meccanismo di lubrificazione è attualmente utilizzato solamente in scalpelli di grosso diametro (superiore al 17” ½) con cuscinetti a rulli.

I “**Sealed Bearings**” hanno un sistema di lubrificazione a tenuta. L’attuale tecnologia prevede due tipologie principali di tenuta:

- tramite un “**o-ring**”, ossia elastomeri che, in base alla ditta costruttrice, differiscono per forme dell’anello, geometrie dell’area di tenuta e tipologie di elastomero;
- mediante una tenuta di tipo “**Metallo - Metallo**”: il dispositivo prevede due anelli metallici finemente lavorati energizzati da uno o due elastomeri.

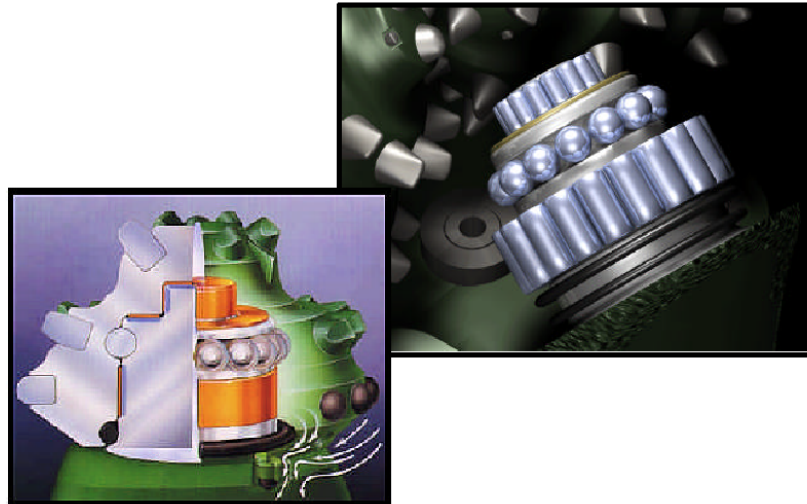


Figura 58 – Sistema di isolamento dei cuscinetti

Nella figura 58 è possibile osservare degli spaccati che illustrano il funzionamento del cuscinetto a sfere e dei sistemi di isolamento dei cuscinetti.

Nei Sealed Bearings un serbatoio di lubrificante è ricavato su ciascuna gamba dello scalpello collegata, tramite un apposito condotto, alla zona dei cuscinetti. Un “**Compensatore di Pressione**”, ossia un diaframma che si flette in funzione della pressione idrostatica nel pozzo, permette di equalizzare la pressione all’interno del cuscinetto con quella all’esterno, per prevenire la rottura della tenuta (Figura 59).

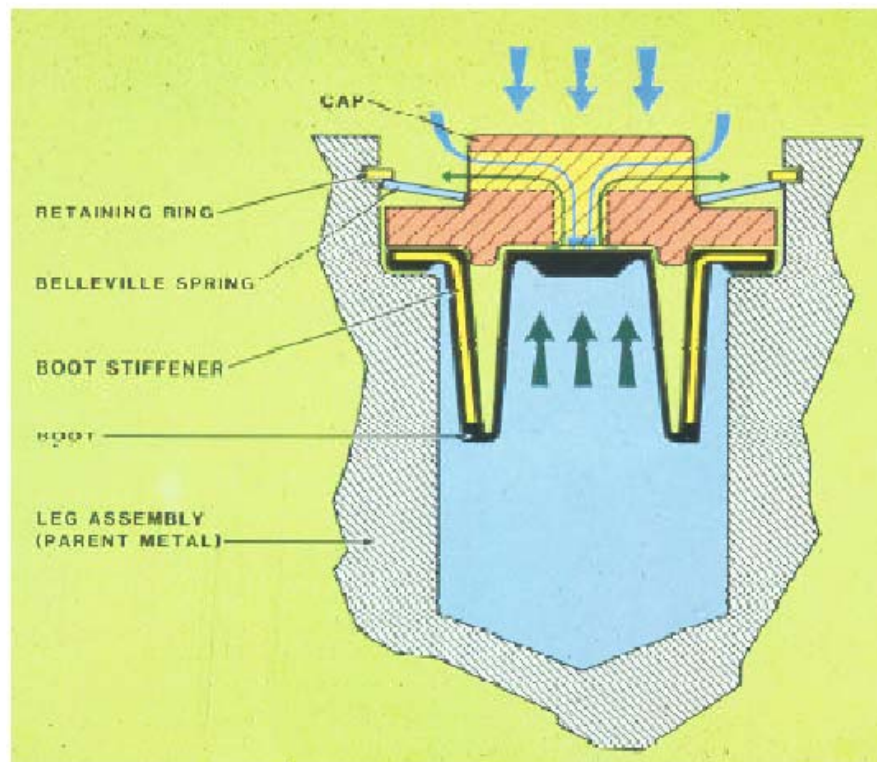


Figura 59 – “Compensatore di pressione”

I “**Friction Bearing Bits**” devono gran parte della loro affidabilità all'integrità perfetta della tenuta. Se questa viene a mancare e del fluido di perforazione entra all'interno della zona dei cuscinetti, si può avere una rapida usura degli stessi, anche senza segnali particolari di aumento della torsione. Per questo, come si vedrà anche più avanti, l'approssimarsi della fine della vita dello scalpello è di difficile valutazione anche attraverso un attento controllo dei parametri di perforazione (in particolare la torsione) rilevabili in superficie.

Al contrario, il processo di usura degli scalpelli a rulli produce normalmente un fenomeno di scheggiatura e al limite di rottura dei rulli dei cuscinetti, con problemi di rotazione del cono fino a portare anche al blocco totale dello stesso. In superficie è quindi più facile il riconoscimento di una rottura incipiente, in particolare osservando i valori di torsione.

6.1.1.4 Numero di denti o inserti per rullo e loro altezza

Visivamente uno scalpello per terreni teneri è facilmente distinguibile da uno scalpello per terreni duri per la differenza nell'**altezza dei taglienti** e nel loro **numero**. Uno scalpello per terreni teneri ha taglienti lunghi e radi, quello per terreni duri ha taglienti corti e fitti. La ovvia differenza sta nel fatto che lo scalpello per terreni duri, per lavorare, ha bisogno di molto carico e questo deve essere ripartito su ogni tagliente (con la necessità che questi siano molti e di altezza ridotta). Per gli scalpelli per terreni teneri non esistono limitazioni al carico specifico sui taglienti. Le grandi spaziature, unitamente all'azione di svellimento, permettono la facile asportazione della roccia.

Altra particolarità degli scalpelli a rulli (vedi figura 60) è data dalla particolare **disposizione dei taglienti** sui coni, che sono predisposti in modo tale che ogni fila di taglienti di ciascun rullo incida sul proprio percorso circolare una porzione di roccia propria, in modo che tutta la superficie del foro venga interessata dall'azione dello scalpello.

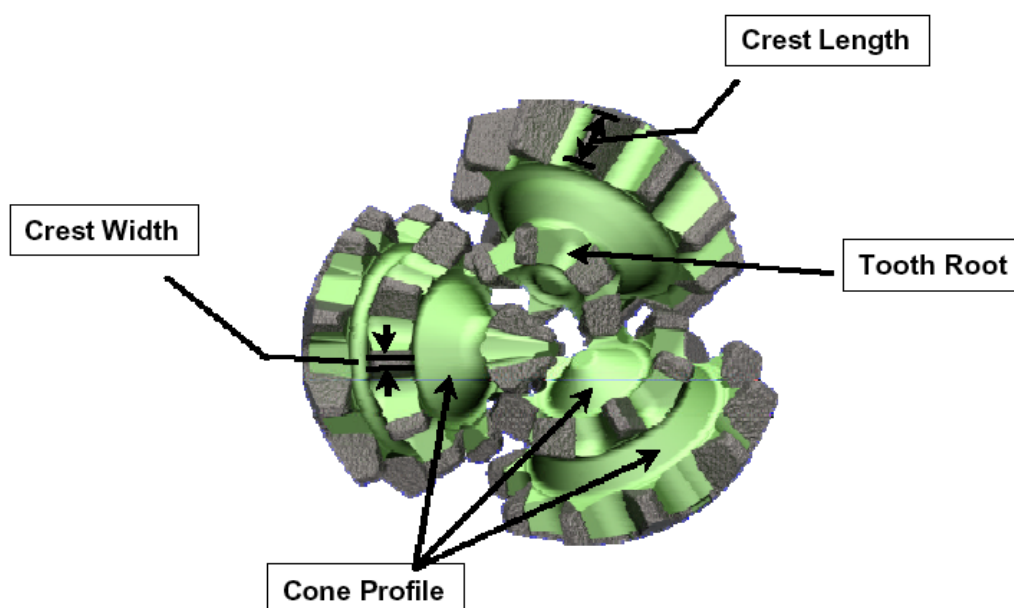


Figura 60 – Disposizione dei taglienti sui coni

Vengono quindi distinte delle file di taglienti sulla superficie dello scalpello ed in particolare la “**Nose Row**” nella parte centrale, la “**Middle Row**” nella parte mediana e la “**Heel Row**” che ricopre la parte esterna (vedi anche figura 54). Quest’ultima parte ha normalmente il compito più gravoso dato l’elevato volume di roccia che viene interessato.

In terreni particolarmente abrasivi viene prevista anche una “**Gauge Row**” per migliorare la protezione sulla parte esterna dello scalpello in modo da evitare o ridurre il fenomeno di riduzione di diametro dello scalpello stesso.

Come precedentemente espresso, la struttura tagliente può essere a “denti” (“**Tooth Bit**”) o a “inserti” (“**Insert Bit**”). I denti sono lavorati direttamente sul corpo del cono, mentre gli inserti (normalmente in Carburo di Tungsteno: “**Tungsten Carbide**”) vengono inseriti a pressione in appositi fori predisposti sui coni (Figura 61). In particolare, in base al tipo di formazione da perforare, sono state sviluppate diverse forme di inserto allo scopo di massimizzare la velocità di avanzamento.

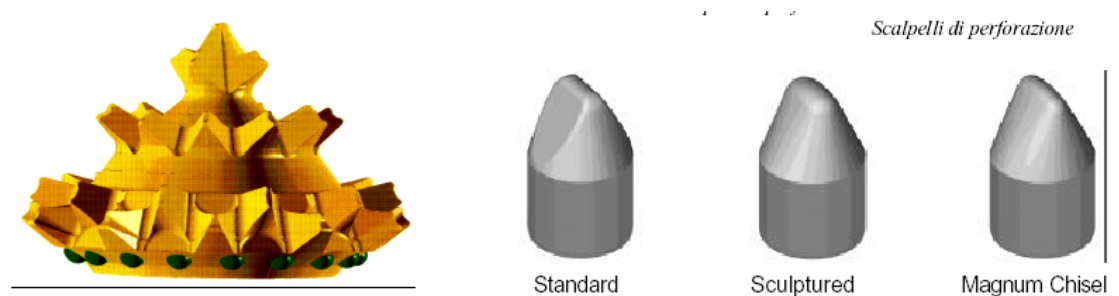


Figura 61 – “Denti” e “Inserti”

6.1.1.5 Protezione dall’usura per abrasione dei denti e dei rulli

I taglienti e i rulli stessi sono soggetti ad abrasione a causa del lavoro di scavo e di strisciamento contro le pareti del foro. Per diminuire l’effetto dell’abrasione sui denti viene applicato un riporto di materiale resistente all’abrasione (“**hard-facing**”). Tale protezione può essere adottata anche sulle spalle dei rulli (“**shirt-tail**”).

La protezione del diametro dello scalpello è di fondamentale importanza per il mantenimento della funzionalità dei cuscinetti, per cui si sono sviluppate tecniche sempre più sofisticate di protezione. Le tecniche di base consistono nel posizionamento di inserti (in carburo di tungsteno o di diamante) sia nella zona del “**gage**” che sulle spalle dello scalpello, con riporti di vari livelli di materiale antiabrasione sulle spalle (Figura 62).

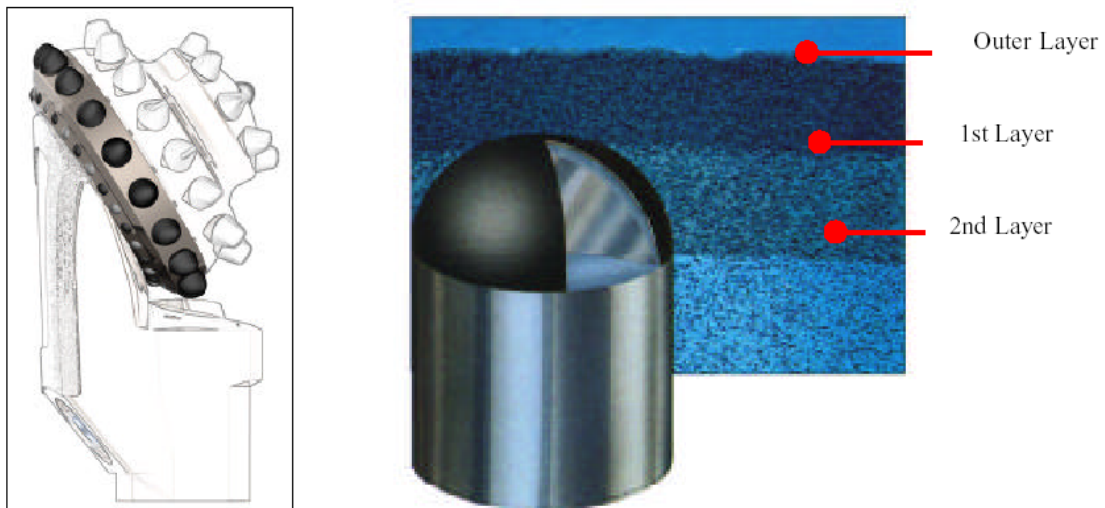


Figura 62 – Protezione del “Gage”

6.1.1.6 Pesì e giri applicabili

Date le svariate tipologie di taglienti e cuscinetti presenti sul mercato è difficile fissare range definiti di parametri di utilizzo.

Come concetto base, a seconda della durezza della roccia da perforare, il **peso** da applicare sullo scalpello dovrà essere adeguato alla resistenza del cuscinetto e al tipo di tagliente usato. Il **numero di giri** è legato alla tecnologia del cuscinetto applicato ed al meccanismo di incisione del tagliente (penetrazione e svellimento in formazioni tenere, compressione e sgretolamento in formazioni dure).

Come ordine di grandezza, i pesi (in Tonnellate su pollice di diametro) ed i giri sono normalmente compresi nei seguenti valori: **pesi** da 2 a 3.6 tonn/in e **giri** da anche oltre 200 fino a 50 rpm passando da formazioni tenere a dure.

6.1.1.7 Influenza del fluido di perforazione ed idraulica dello scalpello

La pulizia e l'asportazione del detrito prodotto dallo scalpello sono affidati al fluido di perforazione e sono funzioni della portata, nel senso che, in generale, maggiore sarà la portata migliore sarà la pulizia del foro, quindi con buone possibilità di migliorare la velocità di avanzamento. La portata è comunque fissata nel “Programma Idraulico” sulla base della potenza che si vuole avere a disposizione allo scalpello, così come è fissato il diametro delle “dusi” (“**nozzles**”) da utilizzare. Le duse hanno lo scopo di creare una velocità di impatto sulla roccia e turbolenza tali da rimuovere rapidamente i detriti prodotti, oltre a fornire essa stessa uno strumento di rottura di detriti, in funzione delle caratteristiche di resistenza della formazione (Figura 63).

A parità di portata, il numero, il diametro, il posizionamento e l'orientamento delle duse sono parametri fondamentali per ottimizzare la velocità di avanzamento dello scalpello; ad esempio, vengono prodotti scalpelli con “**duse centrale**”, per migliorare la turbolenza e la pulizia nella zona compresa tra i coni, o con “**dusi allungate**” (“**extended**”).

nozzles”), per avvicinare il getto del fango al fondo foro massimizzando la velocità e la forza di impatto.

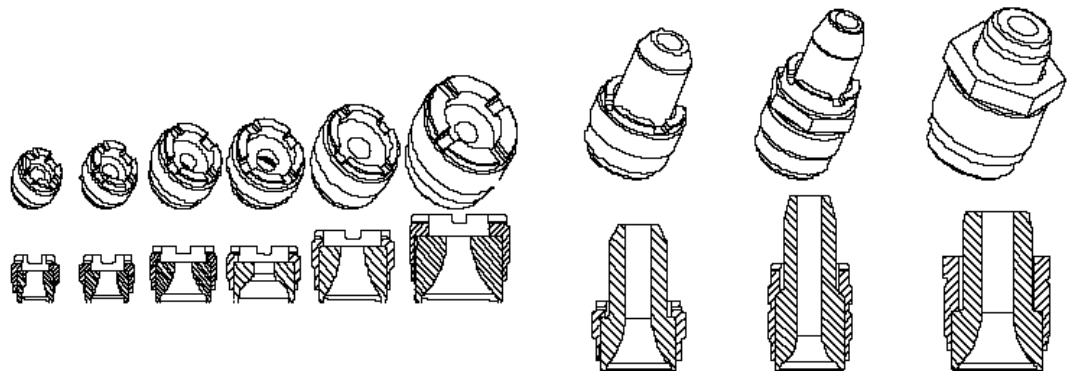


Figura 63 – “Nozzles”

6.1.2 “Fixed Cutter Bits”

I “**Fixed Cutter Bits**” sono fondamentalmente composti da taglienti fissi che scavano la roccia essenzialmente tramite uno sforzo di taglio e abrasione derivante dal peso e dalla rotazione applicati allo scalpello.

Rispetto al “**Rolling Cutter Bits**” il vantaggio principale è quello di non avere parti in rotazione, eliminando quindi la necessità di montare cuscinetti. Si possono distinguere tre tipologie principali di scalpelli, in base al tipo di tagliente utilizzato:

- Scalpelli a Lame (“**Drag Bits**”)
- Scalpelli a Diamanti Naturali (“**Natural Diamond Bits**”)
- Scalpelli a Diamanti Sintetici (“**Polycrystalline Diamond Compacts**”: **PDC**, “**Thermally Stable**

Polycrystalline Diamond”: **TSP**)

6.1.2.1 Scalpelli a Lame

Gli Scalpelli a Lame sono nati con l’introduzione della perforazione rotary e vengono citati solo per motivi storici.

6.1.2.2 “Natural Diamond Bits”

I “**Natural Diamond Bits**” (Figura 64) sono composti da tre parti principali: i Taglienti (“**Cutters**”), il Corpo (“**Body**” o “**Blank**”), ed il Fusto (“**Shank**”).

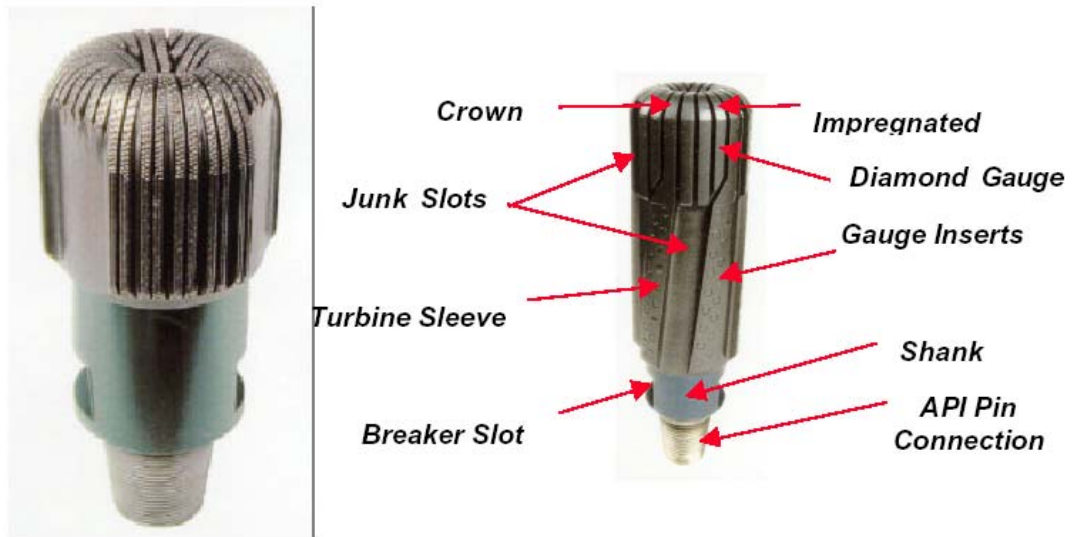


Figura 64 – “Natural Diamond Bits”

I “**Cutters**” sono diamanti sistemati sulla faccia dello scalpello, dal “nose” fino al “gauge”, secondo configurazioni o “plots” particolari. Sono immersi in una matrice (“**matrix**”), ossia in una miscela di polvere di carburo di tungsteno con un metallo legante.

Lo scalpello a Diamanti Naturali può avere profili diversi in funzione della formazione o del tipo di lavoro richiesto:

- Un “**Single Cone Profile**” ha una zona di attacco molto arrotondata, portando quindi ad un limitato carico su ciascun “cutter”; è caratterizzato da una ridotta usura e una durata maggiore.
- Il “**Double Cone Profile**” ha un fronte di attacco più ristretto ed è quindi molto aggressivo nella zona centrale. Questo profilo è caratterizzato da velocità di avanzamento più elevate ma è anche soggetto ad un’usura più veloce.
- Il “**Parabolic Profile**” presenta un fronte di attacco più arrotondato del precedente come compromesso tra velocità di avanzamento e resistenza all’usura.
- Il “**Concave Profile**” ha un fronte molto piatto ed è utilizzato nella perforazione direzionata. Per gli scalpelli a diamanti naturali l’ **idraulica** ha lo scopo principale di raffreddare la faccia dello scalpello e rimuovere il detrito di perforazione. Questo tipo di scalpelli non è fornito di dusi. Fori di uscita del fluido di perforazione sono ricavati nel centro dello scalpello. Il fluido viene quindi indirizzato in canali ricavati sulla faccia dello scalpello.

I canali vengono disegnati secondo due schemi principali:

- “**Radial Flow**”
- “**Cross-Pad Flow**” (o “Feeder-Collector”)

In entrambe le configurazioni l'uscita del fluido di perforazione dal centro dello scalpello avviene tramite un "crow's foot", che distribuisce il flusso in tre rami.

Nel "Radial Flow" il fluido fluisce da questi tre fori in canali che si dirigono radialmente verso l'esterno, mentre nel "Cross-Pad Flow" il fluido fluisce nello stesso modo ma sono ricavati una serie di canali, detti "Collectors", con forma a "V", con vertice nella zona vicina al gauge che, allargandosi velocemente, raggiungono il bordo dello scalpello. Questo tipo di scalpello viene progettato per lavorare con precisi parametri di portata e perdita di carico sulla faccia dello scalpello.

6.1.2.3 Scalpelli a Diamanti Sintetici

Gli scalpelli a Diamanti Sintetici si dividono in due categorie:

- **PDC** o "Polycrystalline Diamond Compact" Bits
- **TSP** o "Thermally Stable Polycrystalline" Bits

I "PDC" vengono realizzati partendo da cristalli di diamante. Un "PDC Cutter" consiste in uno strato sottile (1 mm.) di "polycrystalline diamond" integralmente saldato su un supporto in carburo di tungsteno. Questa struttura è chiamata "Compact" (Figura 65).

Per utilizzi che prevedono lo sviluppo di temperature elevate sono state realizzate tecniche costruttive che producono diamanti industriali a maggiore stabilità termica, i TSP. I "TSP-Bits" sono realizzati con tecniche simili a quelle descritte per gli scalpelli a diamanti naturali. In termini generici, sono idonei a perforare formazioni dure e abrasive.

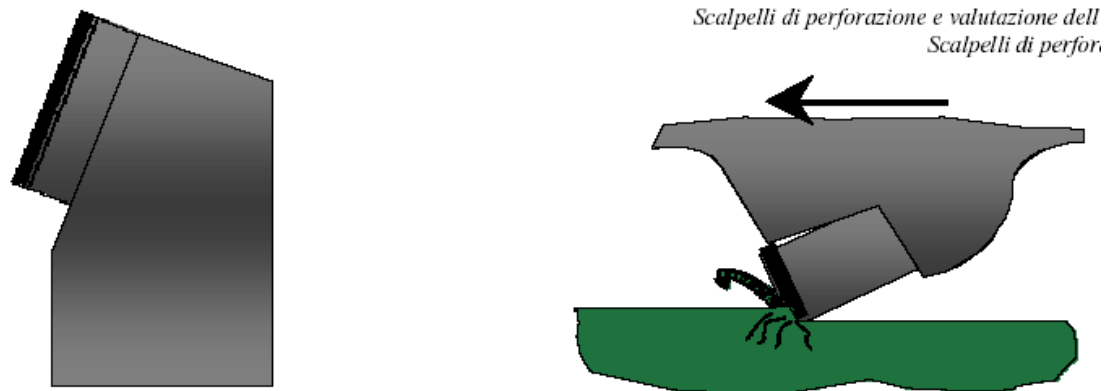


Figura 65 – "PDC Cutter" e sua interazione con il terreno

I "PDC-Bits" si distinguono in due categorie:

- "Steel Body Bits",
- "Matrix Body Bits".

Gli "Steel Bodied Bits" sono costruiti da un unico pezzo di acciaio e sono

quindi caratterizzati da una resistenza strutturale elevata, sia per quanto riguarda le forze di impatto che quelle torsionali. Per combattere il fenomeno dell'erosione, devono essere applicati su certe aree dello scalpello rinforzi di materiale antiabrasione ("Hardfacing"). Sulla superficie sono ricavate le sedi per i "cutters", che vengono inseriti mediante un accoppiamento ad interferenza ("Interference Fitting").

I "Matrix Bodied Bits" (Figura 66) sono manufatti mediante colatura su un corpo in acciaio ("Blank") di una miscela di polvere di carburo di tungsteno con un legante. Un secondo corpo di acciaio, detto "Shank", sul quale è ricavata la connessione dello scalpello, viene saldato al "blank" (Figura 67). La matrice ha lo svantaggio di essere più friabile dell'acciaio, ma presenta una maggiore resistenza all'erosione. Sulla superficie dello scalpello sono ricavate le sedi per i "cutters", che vengono saldati alla matrice mediante saldatura.

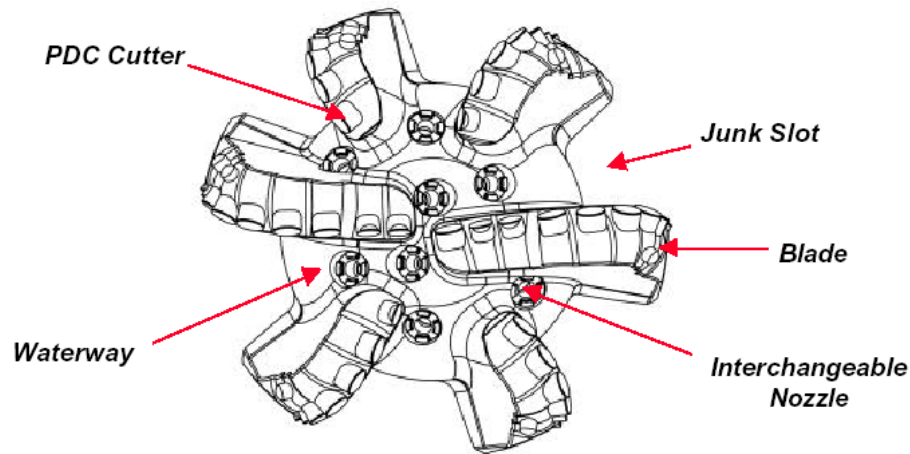


Figura 66 - "Matrix Bodied Bits"

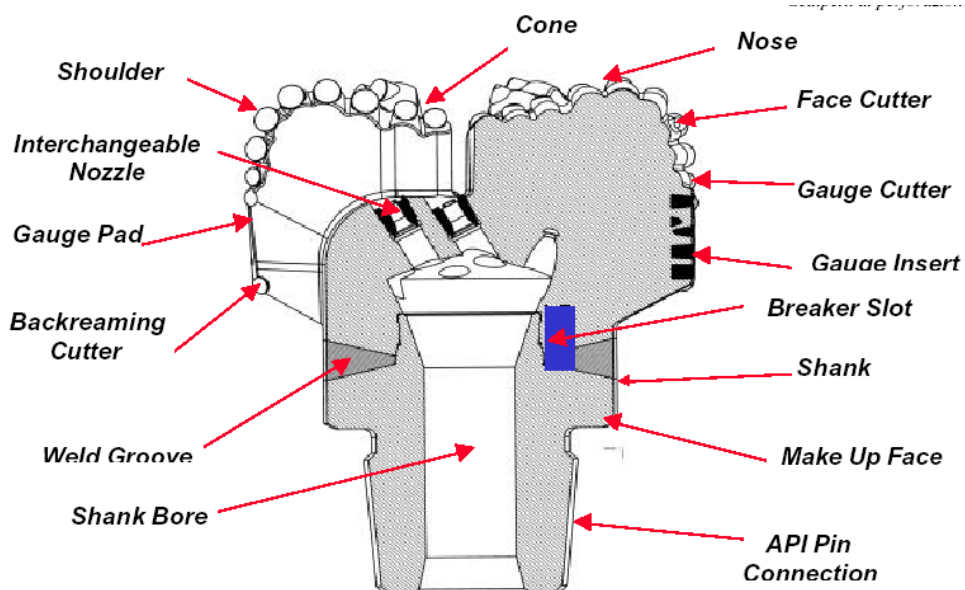


Figura 67 - Componenti dei "Matrix Bodied Bits"

I “PDC Cutters” vengono costruiti di dimensioni standard che vanno da 8 mm fino a 24 mm. Oltre alla dimensione anche il **numero** di “cutters” influenza le performances dello scalpello, nel senso che, un elevato numero di “cutters” permette la perforazione di formazioni più dure ma generalmente risulta un ROP limitato ed un costo dello scalpello elevato. Inoltre anche la **distribuzione** dei “cutters” è un parametro fondamentale della progettazione. Occorre arrivare ad una ottimizzazione del disegno prendendo in considerazione i seguenti concetti principali:

- **Consumo uniforme** dei “cutters”, evitando zone di maggior usura, in modo da massimizzare l’efficienza dello scalpello.
- **Durata ottimale**, in funzione della formazione e del valore supposto di ROP.

I “cutters” possono essere di forma cilindrica, oppure montati su un sostegno detto “Post” o “Stud”. Un ulteriore parametro costruttivo è l’angolo di inclinazione (“**Rake Angle**”) che il “cutter” presenta, ed in particolare vengono definiti un “Back Rake” ed un “Side Rake”. Il “**Back Rake**” definisce l’aggressività del “cutter”, nel senso che minore è il valore dell’angolo maggiore è la profondità di taglio per un dato valore di peso sul “cutter”. Valori normali di “Back Rake” vanno da 15° a 30°, realizzando un giusto compromesso tra velocità di avanzamento e vita dello scalpello. Il “**Side Rake**” misura l’angolo di rotazione della faccia del “cutter” rispetto alla direzione di movimento. Si definisce negativo il valore di quest’angolo quando la faccia del “cutter” è rivolta verso l’interno dello scalpello e quindi un angolo positivo favorisce il movimento del detrito verso l’esterno.

Gli scalpelli PDC vengono costruiti con tre tipi fondamentali di perforazione:

- **Profilo Piatto**, adatto per perforazione di terreni teneri.
- **Profilo a Doppio Cono**, adatto a perforare formazioni più dure.
- **Profilo Parabolico**, adatto per applicazioni con turbina.

Un ulteriore fattore costruttivo è il **numero** di “Lame” o “Blades”. Queste hanno le seguenti funzioni principali:

- Fare da **supporto** alla struttura tagliente: in generale, per formazioni moderatamente dure, che richiedono uno scalpello con molti “cutters”, lo stesso sarà fornito di più lame;
- Determinare il **profilo di flusso idraulico**: lo scopo è di ottimizzare sia la pulizia che il raffreddamento dello scalpello;
- Provvedere ad aumentare l’**esposizione** .

Con lo scopo di migliorare le performances dei “PDC Bits” durante la perforazione di formazioni non omogenee, ma contenenti intervalli, anche sottili, di formazioni più dure, si sono sviluppate tecnologie costruttive che combinano nello stesso scalpello diverse tipologie di taglienti, in particolare PDC con diamanti naturali, o TSP, oppure inserti di carburo di

tungsteno (normalmente rinforzati con l'inserzione di diamanti naturali). Tali scalpelli sono denominati "**Hybrid Bits**".

Dietro il "PDC Cutter" viene posizionato un inserto di carburo di tungsteno rinforzato con diamanti (oppure un TSP). Il PDC svolge il suo normale lavoro di taglio nelle formazioni adatte alle sue caratteristiche. L'inserto viene in aiuto al precedente quando vengono incontrate formazioni più dure ed abrasive, preservando o, almeno rallentando, l'usura del "PDC Cutter".

Un parametro che influenza notevolmente le performances dei "PDC Bits", in particolare nella perforazione di rocce da medie a dure, è la sua stabilità, ossia la sua capacità a lavorare riducendo al minimo le vibrazioni. Queste possono essere laterali (ossia il centro di rotazione dello scalpello varia continuamente di posizione) oppure assiali (con variazioni quindi della profondità di taglio del "cutter" che inducono fluttuazioni di torsione). Questi fenomeni vengono denominati come "**Bit-Whirling**".

6.2 Selezione degli scalpelli

La selezione dello scalpello ottimale da utilizzare per perforare un foro non è sicuramente un processo semplice, e generalmente occorre procedere per tentativi. Normalmente il termine di paragone è basato su parametri economici (vedi "**Costo/Metro**"). Le comparazioni devono essere effettuate fra scalpelli discesi in successione in un determinato pozzo, oppure fra scalpelli utilizzati per perforare una data formazione in pozzi di riferimento, mediante l'aiuto di "**logs elettrici**" (in particolare Sonic, Gamma Ray, e Neutron) e rapporti "**mud logging**".

Per quanto riguarda i pozzi esplorativi la sezione viene effettuata sulla base dei dati disponibili su

formazioni simili presenti nell'area. Per la scelta ottimale degli scalpelli, le caratteristiche della formazione che, tra le altre, occorre considerare sono "Perforabilità" ("**Drillability**") ed "Abrasività" ("**Abrasiveness**"):

- La "**Perforabilità**" di una formazione è una misura della facilità di perforazione. Essa è inversamente proporzionale alla resistenza a compressione della roccia (anche se altri fattori sono altresì influenzanti). La perforabilità tende normalmente a diminuire con la profondità, a parità di altre condizioni.
- L'"**Abrasività**" di una formazione è una misura di quanto rapidamente un tagliente viene consumato durante la perforazione della formazione stessa. Benché ci possano essere eccezioni, si può affermare che l'abrasività tende ad aumentare con il diminuire della perforabilità della roccia.

Spesso, inoltre, la scelta dello scalpello viene effettuata sulla base delle condizioni di usura dell'ultimo scalpello estratto; ad esempio, per scalpelli a rulli, se l'usura dei taglienti è inferiore a quella dei cuscinetti si può optare per uno scalpello con taglienti più lunghi (o, se possibile; aumentare il peso sullo scalpello), oppure, al contrario, se l'usura dei cuscinetti è inferiore a quella dei taglienti occorre ridurre l'altezza del tagliente (o diminuire il peso sullo scalpello), [R. Deidda, G. Cavagnero, **SCALPELLI**

DI PERFORAZIONE – Caratteristiche tecniche – Analisi dei parametri – Ottimizzazione della battuta di perforazione, Corso di “DRILLING & COMPLETION ENGINEERING” 1997-98, Bibliografia 6)].

Un’attenta valutazione dello scalpello estratto e la registrazione dei parametri di utilizzo sono quindi di fondamentale importanza per la compilazione del “Rapporto Scalpelli” (“**Bit Record**”), rapporto che costituisce un documento fondamentale per ciascun pozzo.

6.3 Meccanismi di rottura della roccia

I principali meccanismi di rottura della roccia da parte di uno scalpello sono: raschiatura (“**scraping**”) o scavo (“**gouging**”), aratura (“**plowing**”) e macinazione (“**grinding**”), erosione (“**erosion**”) da parte del fluido di perforazione, scheggiatura (“**chipping**”) e rottura (“**chrushing**”), taglio (“**shearing**”). In alcuni casi, uno scalpello può lavorare utilizzando questi meccanismi in combinazione fra loro. Spesso, uno dei meccanismi è predominante per una certa categoria di scalpelli.

6.3.1 Scalpelli a rulli

Per quanto riguarda gli **scalpelli a rulli** si può affermare che quelli per formazioni tenere, costruiti con offset elevati, lavorano prevalentemente per scavo e raschiatura (“**gouging & scraping**”), mentre a offset bassi (applicazioni in formazioni dure) diventano predominanti i fenomeni di scheggiatura e rottura (“**chipping & crushing**”). Questo fenomeno di rottura è anche noto come “**Crater Mechanism**”.

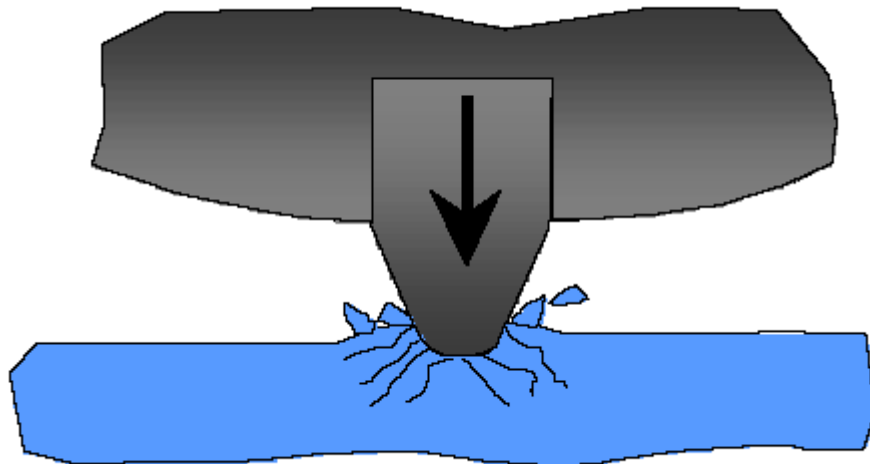


Figura 68 – “Crater Mechanism”

Per effetto della rotazione il peso applicato sul tagliente aumenta fino a quando viene superata la resistenza a rottura della roccia ed un cuneo (“**wedge**”) di roccia frantumata si forma sotto il tagliente. Con l’aumentare del peso e per effetto dell’angolo di offset, le spinte laterali che si originano dal cuneo formatosi esercitano uno sforzo di taglio sulla roccia confinante, fino a quando la sollecitazione supera la resistenza al taglio della roccia, generando delle fratture. Si viene quindi a formare una zona di roccia

fratturata che viene espulsa dal cratere (Figura 68).

A questo punto è necessario che il fluido di perforazione invada velocemente queste fratture, per garantire l'equalizzazione della pressione tra fluido e formazione. In caso contrario, la forza dovuta alla differenza di pressione tende a mantenere le schegge incollate alla formazione, riducendo quindi l'avanzamento.

6.3.2 Scalpelli a diamanti naturali

Il meccanismo di rottura della roccia per **scalpelli a diamanti naturali** è detto di aratura ("plowing"), ossia il diamante avanzando crea un solco nella formazione. Questo è accompagnato anche da un fenomeno di macinazione ("grinding") della roccia (Figura 69).

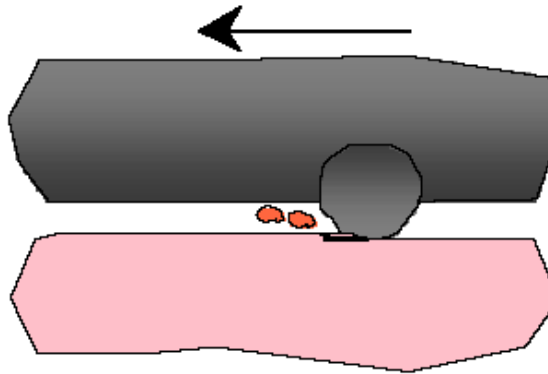


Figura 69 – "Plowing" e "Grinding"

6.3.3 Scalpelli PDC

Il meccanismo di rottura della roccia, per **scalpelli PDC**, è detto di taglio ("shearing"), ossia il "cutter" avanza tagliando a fette la formazione (Figura 70).

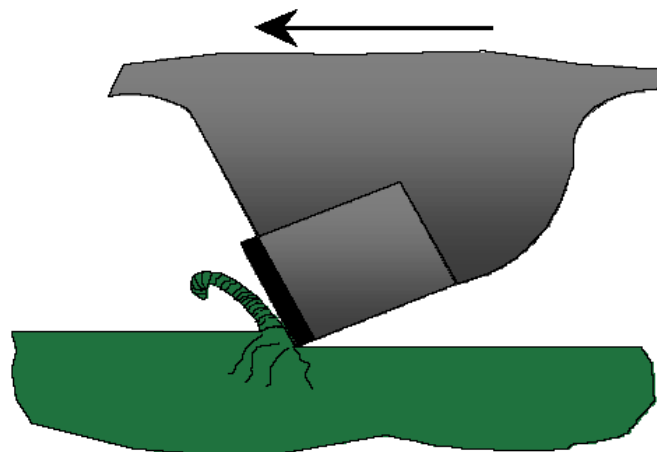


Figura 70 – "Shearing"

6.4 Valutazione dell'usura e fattori che la influenzano

Gli scalpelli estratti dal pozzo vengono controllati per la valutazione

dell'usura. I consumi controllabili e quantificabili sono:

- Consumo dei **taglienti**
- Consumo dei **cuscinetti**
- Consumo del **diametro**

6.4.1 Consumo dei taglienti

Il consumo dei taglienti dello scalpello viene dato in “ottavi” della loro altezza residua dopo la battuta (Figura 71). La valutazione del consumo viene espressa con la lettera “T” (teeth = dente) e da un numero progressivo da 1 a 8.

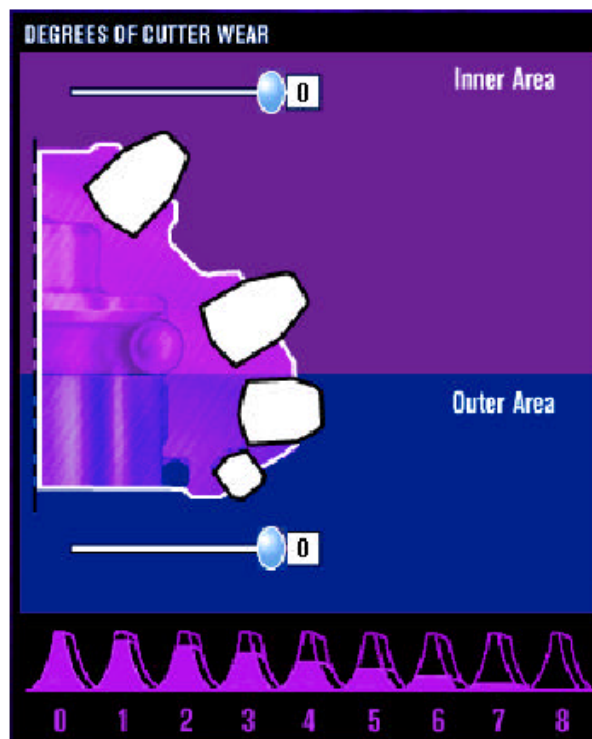


Figura 71 – Consumo dei taglienti

La velocità di usura di un tagliente dipende principalmente dai seguenti fattori:

- **Abrasività** della formazione
- **Geometria** del tagliente
- Peso sullo scalpello (**WOB**)
- Velocità di rotazione (**RPM**)
- Azione di **pulizia** e **raffreddamento** del fluido di perforazione

L'usura di un tagliente è definita come il rapporto fra l'altezza del

medesimo e l'altezza originale. Normalmente la velocità di usura di un tagliente può considerarsi proporzionale alle ore di rotazione. Per quanto riguarda gli **scalpelli a denti** questa assunzione si avvicina al caso reale, in particolare nel caso in cui la struttura autoaffilante del dente è favorita dall'"**Hard-facing**" dello stesso (Figura 72).



Figura 72 – "Hard-facing"

Per gli **scalpelli a inserti** il problema è più complesso. L'usura del tagliente è generalmente meno importante rispetto alla rottura dello stesso, anzi il fenomeno della rottura o perdita di inserti accelera l'usura globale della struttura tagliente (Figura 73).



Figura 73 – Perdita degli inserti

Lo stesso fenomeno vale per gli **scalpelli a diamanti naturali**, dove l'usura non è particolarmente influenzata dall'usura del singolo "cutter", bensì dal numero di questi persi o rotti. Inoltre la velocità di usura è fortemente influenzata dall'azione di raffreddamento apportata dal fango

di perforazione.

L'usura degli **scalpelli a PDC** è paragonabile a quella degli scalpelli a denti, nel senso che è preponderante l'usura dei taglienti rispetto a quella degli altri componenti. Anche in questo caso, però, ci possono essere fenomeni di rottura o perdita dei "cutters" che portano ad un'accelerazione dell'usura globale.

6.4.2 Consumo dei cuscinetti

La valutazione del consumo dei cuscinetti è più difficoltosa e richiede molta esperienza, essendo soggettiva. In pratica, per quantificarla, dopo aver ben lavato i coni, si cerca di stabilire il gioco che si è creato durante la battuta, fra ogni rullo e il relativo asse. Tenuto conto che il cuscinetto è soggetto ad un usura rapida nelle ultime ore di lavoro, ci si deve domandare quante ore lo scalpello avrebbe potuto ancora lavorare con i parametri applicati. Se la risposta si ritiene sia zero, significa che la durata della battuta ha coinciso con lo sfruttamento totale della vita dei cuscinetti.

La valutazione dell'usura dei "bearings" con i grafici di riferimento verrà presentata nel capitolo dedicato al "Modello di Bourgoyne e Young", e per la precisione, nel paragrafo che tratta della modellizzazione del "**Bit-Wear**".

Nel momento in cui le superfici di un cuscinetto iniziano ad essere danneggiate, la velocità di usura aumenta rapidamente. Normalmente, come si vedrà nei prossimi capitoli, il problema si semplifica considerando una velocità di usura dei bearings di tipo lineare. Inoltre, le case costruttrici definiscono usualmente la vita del cuscinetto in termini di "**numero totale di rivoluzioni**" ("Total Revolutions"), sempre che il numero di giri applicato alla batteria sia contenuti in un range di valori tali da prevenire un eccessivo surriscaldamento degli stessi.

Si può assumere, quindi, per semplicità, che la vita dei cuscinetti vari linearmente con il numero di giri applicati. Occorre inoltre distinguere il tipo di cuscinetto adottato: "**nonsealed roller**", "**sealed roller**", "**sealed journal**".

L'effetto del peso sullo scalpello (**WOB**) dipende dal tipo e dalla dimensione del cuscinetto e dal fatto che esso sia del tipo standard o con guarnizione ("**sealed**"). Quando il cuscinetto non è del tipo "sealed", essendo la lubrificazione dovuta al fluido di perforazione, anche le proprietà del **fango** hanno un effetto sulla vita del cuscinetto. Il fango ha inoltre il compito di raffreddare i cuscinetti, riducendone quindi l'usura. Si ritiene comunque che le normali portate utilizzate in perforazione siano sufficienti ad assolvere questo compito. Portate eccessive, però, potrebbero comportare fenomeni di erosione sul corpo dello scalpello e quindi, particolarmente per scalpelli di tipo "sealed", un danneggiamento prematuro del cuscinetto, con possibile perdita o rottura del cono (Figura 74).



Figura 74 – Rottura del cono

6.4.3 Consumo del diametro

Il **diametro** degli scalpelli è protetto dall'usura mediante varie tecniche, quali il riporto di materiale antiabrasione o il posizionamento di inserti resistenti all'usura posti sul "gage". Questi accorgimenti in presenza di rocce altamente abrasive non sono però del tutto sufficienti ad evitare consumi del diametro.

Nella figura 75 è mostrato il metodo di misurazione del diametro. In pratica, si infila intorno al bit usurato un anello di diametro pari a quello originale dello scalpello e si misura con un apposito righello la differenza tra i due.



Figura 75 – Misurazione del diametro

6.5 Fattori che incidono sulla velocità di perforazione

La **velocità di avanzamento**, insieme con la **durata della battuta**, ha un effetto diretto sul "**costo a metro**" di uno scalpello.

Le variabili principali che influenzano la velocità di avanzamento si possono riassumere in:

- **Tipo** di scalpello
- Caratteristiche della **formazione**
- Proprietà del **fluido** di perforazione
- Parametri di utilizzo (**WOB** e **RPM**)
- **Usura** dei taglienti
- **Idraulica** dello scalpello

6.5.1 Tipo di scalpello

La scelta del tipo di scalpello ha un effetto primario sulla velocità di avanzamento. Per gli scalpelli a rotazione, la velocità di avanzamento iniziale è spesso più alta in una data formazione quando si usano scalpelli con taglienti lunghi e un largo angolo di *offset*. Tuttavia questi scalpelli vengono usati solo in formazioni soffici a causa della rapida usura e della bassa velocità d'avanzamento nelle formazioni dure. Per ottenere il minor costo al metro solitamente si utilizza un tagliente di maggior lunghezza che garantisce una maggiore vita e consistenza con un'ottima durata del cuscinetto con alte prestazioni.

Gli scalpelli diamantati sono progettati per un dato avanzamento a giro, in base alle dimensioni ed al numero dei diamanti o degli inserti in PCD. La larghezza ed il numero dei taglienti possono essere usati per calcolare il numero necessario di lame. La lunghezza dei taglienti che escono dalla punta influisce, naturalmente, sulla profondità del taglio.

6.5.2 Caratteristiche della formazione

Il limite elastico e la resistenza alla rottura della formazione sono le principali proprietà meccaniche che influenzano la velocità di avanzamento. Come abbiamo già accennato in precedenza, la resistenza a taglio mostrata dai criteri di rottura di Mohr, qualche volta è usata per caratterizzare la resistenza della formazione. Per determinare la resistenza a taglio da una prova a compressione, è stato assunto come angolo di attrito interno, un valor medio di 35 gradi. Infatti, l'angolo d'attrito varia tra i 35 ed i 40 gradi.

Applicando l'equazione di una prova a compressione standard a pressione atmosferica ($\sigma_3=0$), otteniamo:

$$\tau_0 = \frac{1}{2} (\sigma_1 - 0) \sin (90 - \theta) = \frac{\sigma_1}{2} \cos \theta$$

La soglia della forza oppure il peso dello scalpello (W/d), richiesti per iniziare la perforazione, sono stati ottenuti con un grafico in cui la velocità di scavo è funzione del peso e del diametro della scalpello e quindi ricavando a ritroso, fino a zero, la velocità di scavo. La relazione ottenuta in laboratorio in questo modo, è mostrata in figura 76.

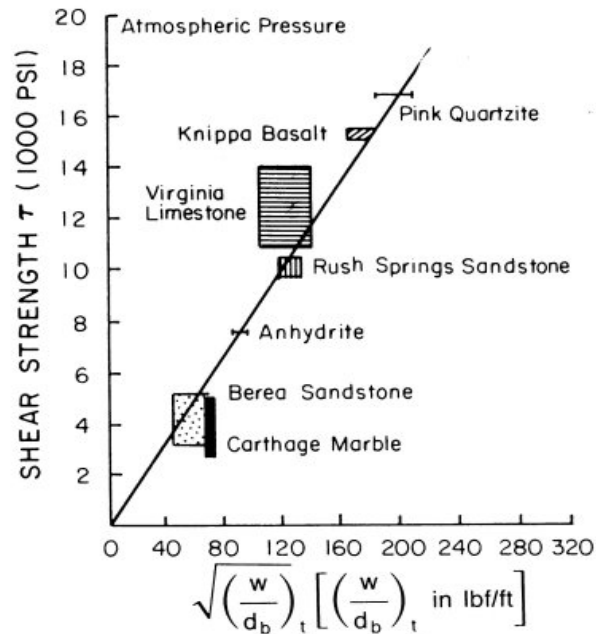


Figura 76 - peso sullo scalpello a pressione atmosferica

Anche la permeabilità influenza fortemente la velocità di avanzamento. In rocce permeabili il fluido di perforazione può iniziare il suo movimento all'interno della roccia uguagliando la pressione differenziale agente sul frammento di roccia formatasi sotto il tagliente, favorendo il fenomeno di esplosione della formazione dal cratere di scavo e incrementando la velocità di avanzamento.

Infine la composizione mineralogica può incidere sulla velocità d'avanzamento: ad esempio formazioni contenenti minerali duri e abrasivi come il quarzo (arenarie e/o formazioni silicizzate), possono portare ad un'eccessiva e più rapida usura dei taglienti, oppure la presenza di argille idratibili, comporta problemi "imballamento" dello scalpello.

Convenzionalmente le formazioni sono classificate nelle seguenti categorie, in funzione della loro resistenza a compressione:

- **Very Low Strength:** <4.000 psi; argille plastiche e tenere, argille tenere, sabbie sciolte ed inconsolidate.
- **Low Strength:** 4.000 – 8.000 psi; argille, argilliti, sabbie argillose, evaporiti tenere, siltiti tenere.
- **Medium Strength:** 8.000 – 16.000 psi; conglomerati, calcari sabbiosi o argillosi, marne, arenarie medie o medio-dure, argille dure.
- **High Strength:** 16.000 – 32.000 psi; dolomie dure, calcari cristallini, arenarie dure, argilliti dure.
- **Very High Strength:** >32.000 psi; arenarie fini e siltiti dure, selce, quarziti, rocce ignee e metamorfiche.

6.5.3 Proprietà del fluido di perforazione

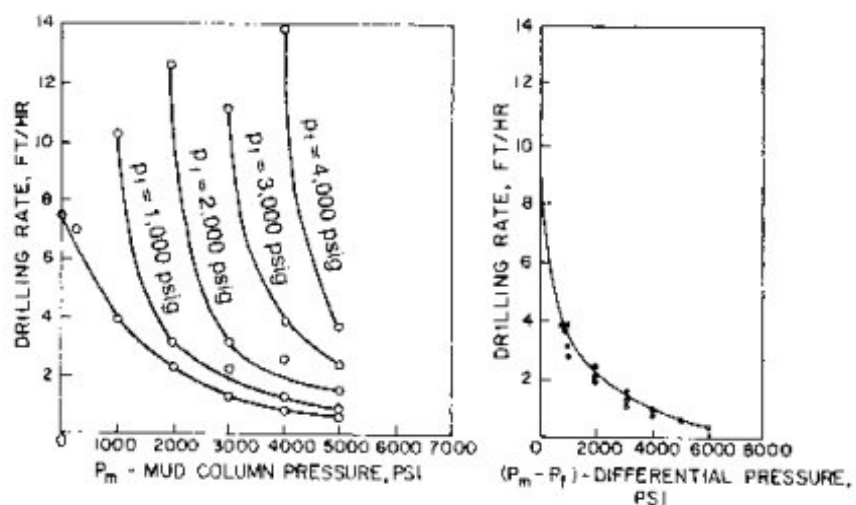
Le proprietà del fluido di perforazione che influenzano la velocità di avanzamento sono:

- **Densità**
- **Proprietà reologiche** di flusso
- Caratteristiche di **filtrazione**
- Contenuto in **solidi** e **granulometria**
- **Composizione chimica**

La velocità di avanzamento tende a diminuire con l'aumentare della densità, della viscosità e del contenuto in solidi. La densità, il contenuto in solidi e le caratteristiche di filtrazione del fango controllano la pressione differenziale nella zona di roccia frantumata posta sotto il tagliente (vedi teoria del “**Crater Mechanism**” nel primo capitolo).

La viscosità incide in quanto, aumentando le perdite di carico nella batteria di perforazione, diminuisce la potenza idraulica disponibile allo scalpello. Inoltre le proprietà reologiche influenzano la pulizia del foro ed in particolare la rimozione del detrito dalla zona del tagliente. La composizione chimica è importante, ad esempio, nella perforazione delle argille, dove fenomeni di idratazione possono dipendere da questo parametro.

L'utilizzo di “**Oil Based Mud**” favorisce la perforazione con PDC-Bits, favorendo l'inibizione delle argille e riducendo i valori di torsione e i rischi di presa della batteria con la sua azione lubrificante. L'effetto principale è comunque quello legato alla densità del fluido di perforazione, ed in particolare all’”**Over-balance**” fra fluido e formazione (Figura 77).

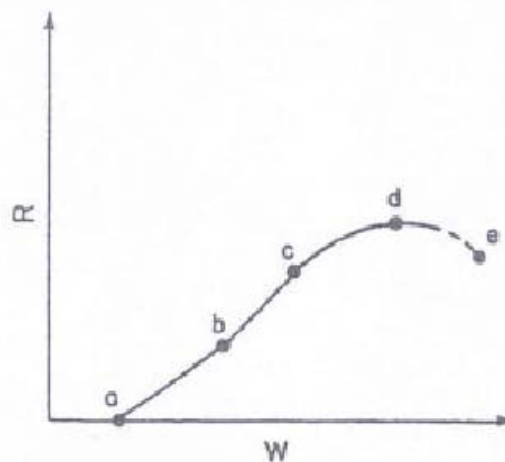


.Figura 77 – “Over-balance”

6.5.4 Parametri di perforazione

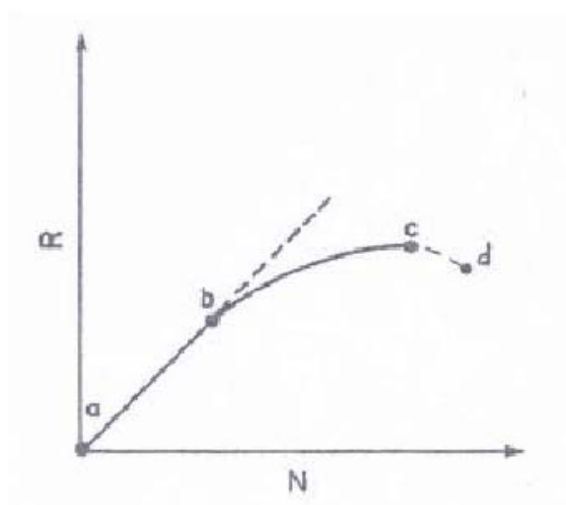
L'andamento della relazione fra velocità di avanzamento e **peso sullo scalpello**, con tutti gli altri parametri costanti, è riportato nella figura 78, nella quale "W" indica il "WOB" e "R" indica l'"ROP".

Nessun avanzamento significativo viene ottenuto fino al raggiungimento di un valore di soglia di WOB (punto **a**). L'avanzamento poi aumenta rapidamente con l'aumentare del peso in modo più o meno lineare (tratti **ab** e **bc**). Aumentando ancora il peso, l'incremento di avanzamento non è più lineare, anzi, in alcuni casi, l'avanzamento tende a diminuire, fenomeno che è probabilmente dovuto o ad una totale penetrazione del tagliente nella roccia, oppure ad una inefficiente pulizia del fondo del foro in relazione ad una elevata produzione di "cuttings".



.Figura 78 – Relazione "ROP" - "WOB"

La relazione tra velocità d'avanzamento e **giri dello scalpello**, con tutti gli altri parametri tenuti costanti, è riportato in figura 79, nella quale "N" indica l'"RPM" e "R" indica l'"ROP".



.Figura 79 – Relazione "RPM" - "ROP"

L'avanzamento aumenta linearmente con i giri fino ad un dato valore di

giri (punto **b**). A valori elevati, la risposta dell'avanzamento all'aumentare dei giri tende a diminuire. Anche questo fenomeno è normalmente attribuito ad una minore efficienza nella pulizia del foro.

6.5.5 Usura dei taglienti

Come già esposto nel paragrafo dedicato all'usura dei taglienti, la velocità di avanzamento è sensibilmente influenzata dall'usura: maggiore è quest'ultima, minore è l'"ROP".

6.5.6 Idraulica dello scalpello

L'utilizzo delle duse è stato introdotto nel 1953, portando subito ad un notevole incremento della velocità di avanzamento, in quanto l'azione di "jetting" migliora la pulizia sia dei taglienti che del fondo foro.

Successivi miglioramenti si sono avuti con l'utilizzo della duse centrale (Figura 80), in particolare per evitare fenomeni di "Bit-balling" in terreni soffici, e di "Extended Nozzles" (Figura 81).

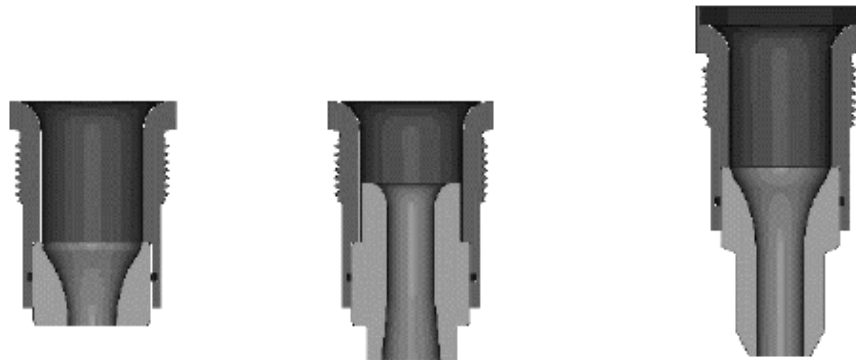


Figura 80 – Duse centrale

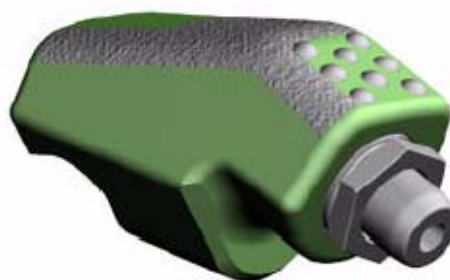


Figura 81 – "Extended Nozzles"

Non è stato definito uno specifico parametro idraulico che caratterizzi l'effetto dell'idraulica sulla velocità d'avanzamento. In genere comunque, si utilizzano la **potenza idraulica** allo scalpello ("Horsepower"), la **forza d'impatto** del getto ("Jet Impact Force"), o la **velocità di flusso** alla duse.

In figura 82 è mostrato un ipotetico esempio di comportamento molto comune. A

bassi pesi dello scalpello ed a basse velocità di penetrazione, la pressione idraulica richiesta per pulire il foro è piccola. Applicando un peso maggiore alla punta e diventando più marcata l'azione di taglio, si raggiunge un punto di imballamento dove i detriti non sono rimossi così velocemente come sono generati. Se la pressione idraulica aumenta, verrà raggiunto un maggior peso e sarà raggiunta la velocità di penetrazione prima che avvenga l'imballo dello scalpello.

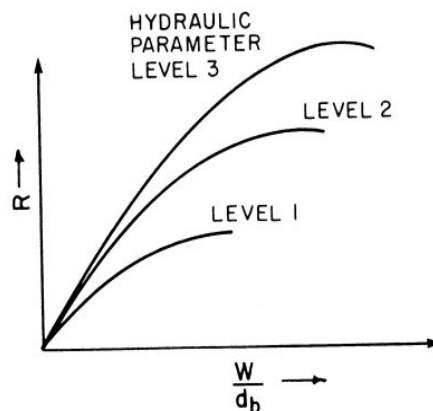


Figura 82 - Relazione tra l'idraulica dello scalpello e la velocità d'avanzamento

Eckel⁷, lavorando con micro-scalpelli con una macchina da scavo in laboratorio, ha portato a termine il più esteso studio di laboratorio sulla relazione tra velocità di penetrazione e pressione idraulica. Lavorando a peso e velocità di rotazione costanti, Eckel trovò che la velocità d'avanzamento poteva essere correlata al numero di Reynolds attraverso la formula:

$$N_{Rc} = K \frac{\rho v d}{\mu_a}$$

dove

K = costante scalare

⁷ Sultanov, R. and Shandalov, G.: "Effects of Geological Conditions on Well Deviation", (in Russo), *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Geol. Razved.* (1961)

ρ = densità di scavo

v = velocità del flusso

d = diametro dell'ugello

μ_a = viscosità apparente del fluido di scavo a 10.000 secondi⁻¹

La velocità di taglio di 10.000 secondi⁻¹ è stata scelta come rappresentativa della viscosità presente all'ugello della punta. La costante di scala K è arbitraria, ma Eckel usò un valore di 1/1.976 per ottenere un intervallo conveniente del numero di Reynolds.

I risultati delle esperienze di Eckel sono riassunte nelle figure 78 e 79. La velocità di avanzamento aumenta all'aumentare del numero di Reynolds su tutto l'intervallo studiato. Una volta accresciuto il peso sullo scalpello, la curva di correlazione viene semplicemente traslata come mostrato nella figura 79. Il comportamento al punto di imballamento non è stato studiato da Eckel. Può essere dimostrato che, per un dato fluido di perforazione, la funzione del numero di Reynolds ha un massimo quando la forza d'impatto del getto è massima.

Nonostante la correlazione convincente presentata nelle figura 83 e 84, il lavoro di Eckel non è stato applicato in pratica.

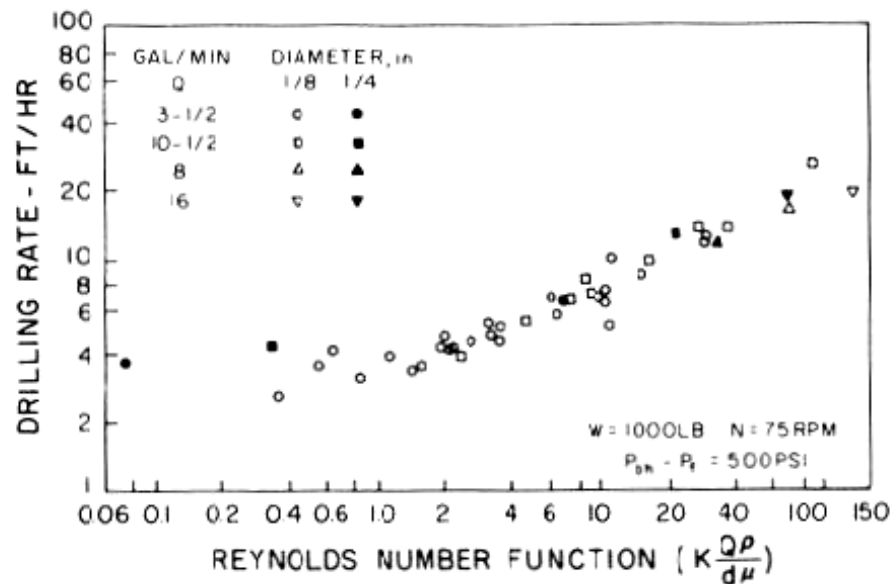


Figura 83 - Velocità d'avanzamento come funzione del numero di Reynolds

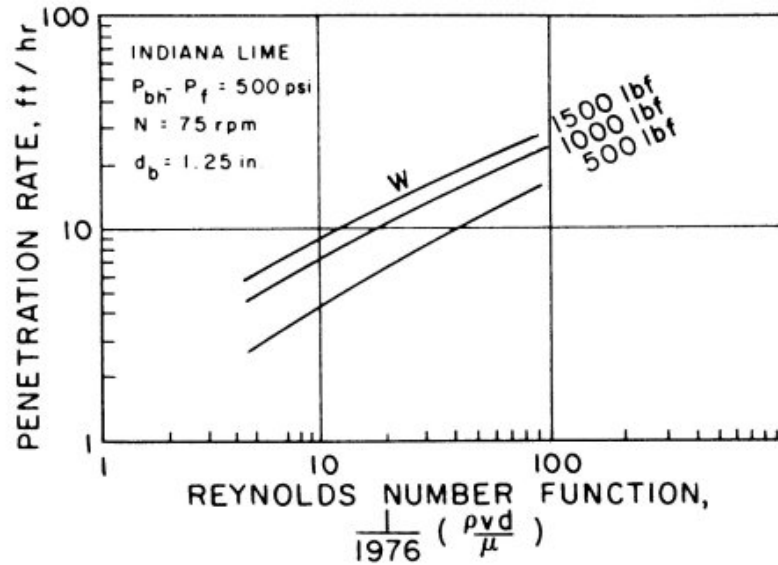


Figura 84 - Effetti sperimentamente osservati del peso dello scalpello e del numero di Reynolds dello scalpello, sulla velocità di avanzamento

La potenza idraulica e la forza d'impatto del getto sono usate più frequentemente nello sviluppo delle correlazioni tra l'idraulica dello scalpello e la velocità di penetrazione. Recenti risultati ottenuti in esperimenti a grande scala di condotti in laboratorio in condizioni simulate

di fondo foro⁸, hanno dimostrato che il numero di Reynolds del getto, la potenza idraulica, e la forza d'impatto del getto, danno risultati simili quando vengono usate per correlare l'effetto del getto idraulico dello scalpello con la velocità di penetrazione. La fig. 85 mostra le correlazioni ottenute per ognuno di questi parametri usando dati ottenuti nelle argille friabili di Mancos con uno scalpello 7,875-in.(20,0025 cm) Smith F3¹⁰.

Nelle figure 86 e 87 vengono mostrare delle correlazioni tra alcuni parametri idraulici e la velocità di avanzamento: nella prima si può osservare la dipendenza dell'"ROP" dal "Jet Impact Force", mentre nella seconda i parametri graficati sono l'"ROP" e "Jet Hydraulic Horsepower".

⁸ Smith, M.B. and Cheatham, J.B. : "Deviation Forces Arising From Single Bit Tooth Indentation of an Anisotropic Porous Medium", *Trans.,ASME*, Series 399 (1977)

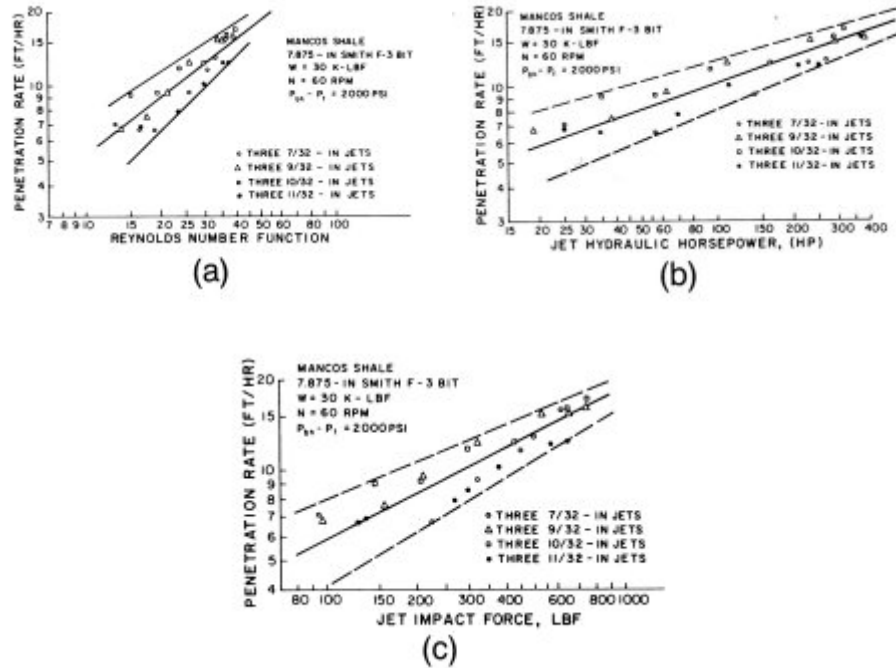


Figura 85 - Effetto dell'idraulica dello scalpello sulla velocità di penetrazione nei calcari di Mancos in condizioni di fondoforo simulate: (a) correlazione osservata usando il numero di Reynolds come parametro idraulico, (b) correlazioni osservate usando la potenza idraulica dello scalpello come parametro idraulico, (c) correlazione osservata usando come parametro idraulico la forza d'impatto del getto

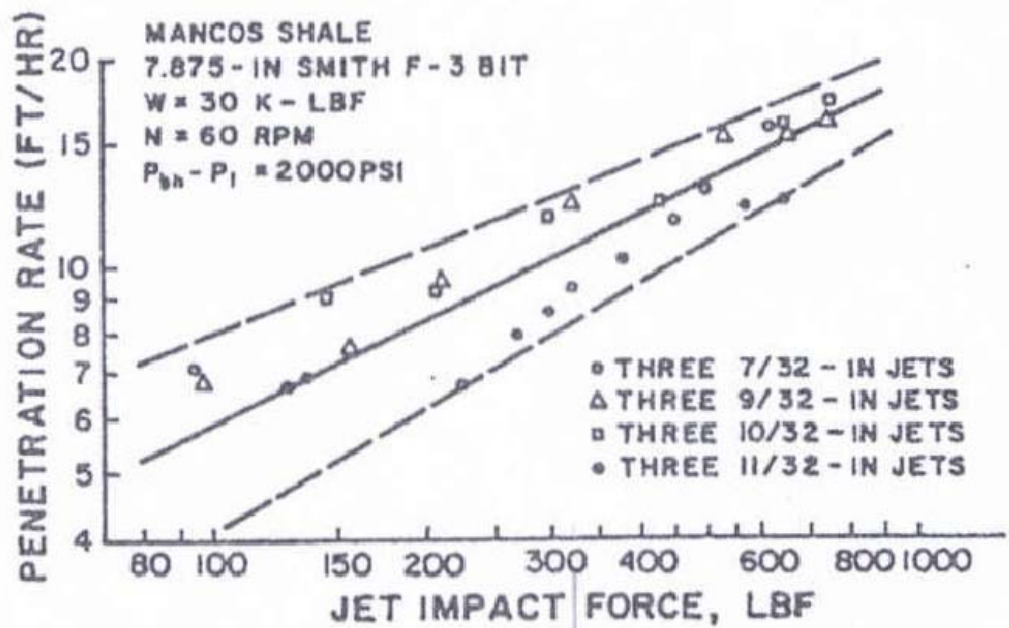


Figura 86 - Relazione "Jet Impact Force" - "ROP"

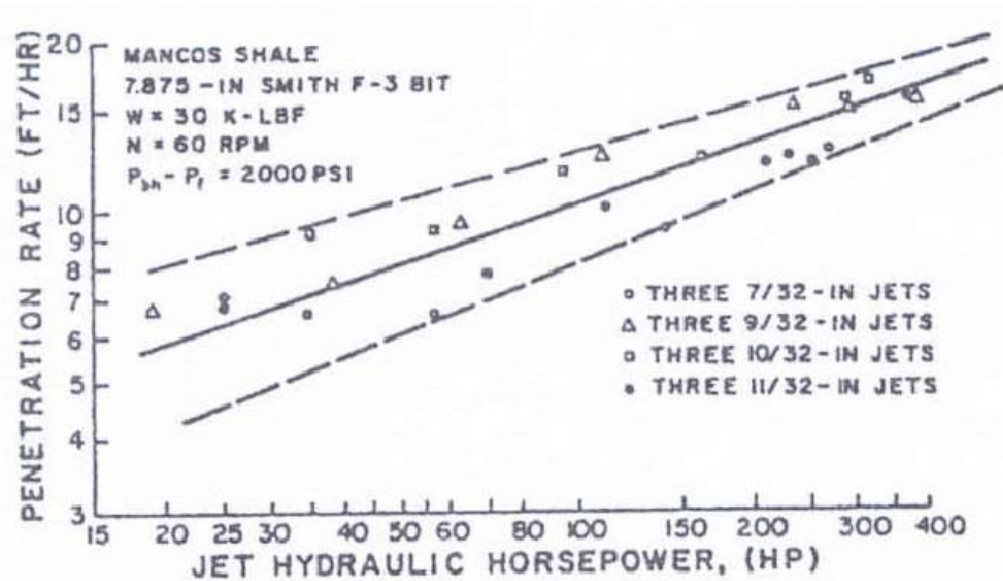


Figura 87 – Relazione “Jet Hydraulic Horsepower” – “ROP”

6.6 Modelli predittivi della velocità di avanzamento

Il modo in cui le variabili di scavo che sono state precedentemente trattate interessano la velocità di avanzamento è abbastanza complesso e solo in parte chiaro. Quindi lo sviluppo di un accurato modello matematico del processo di scavo non è ancora possibile. Tuttavia, sono stati proposti molti modelli matematici che tentano di unire le relazioni conosciute. Questi modelli rendono possibile l'applicazione di metodi di ottimizzazione formale al problema della selezione del miglior peso dello scalpello e della più opportuna velocità di avanzamento per ottenere il minor costo al metro. Molti autori hanno riportato significanti riduzioni nei costi di scavo attraverso l'uso di questi modelli matematici sebbene approssimati.

Gli scalpelli diamantati, così come altri tipi di scalpelli a lame, sono destinate a realizzare una massima penetrazione stabilita. In condizioni ideali, il peso dello scalpello e la torsione sono tali che lo scalpello continua ad incidere la formazione alla velocità di taglio prefissata. La velocità di avanzamento dello scalpello a lame, per una data penetrazione degli elementi taglienti nella formazione, è data da:

$$R = L_{pe} n_{be} N,$$

dove

L_{pe} = effettivo avanzamento di ciascun tagliente,

n_{be} = effettivo numero di lame,

N = velocità di rotazione.

Peterson⁹ ha sviluppato equazioni teoriche per l'effettivo avanzamento L_{pe} e l'effettivo numero di lame n_{be} , per gli scalpelli diamantati. Le equazioni sono derivate per un modello semplificato che presuppone quanto segue:

1. La punta ha una faccia piana perpendicolare all'asse del foro.
2. Ogni lama è formata da diamanti disposti lungo un profilo elicoidale (vedi fig. 88a).
3. I diamanti sono sferici come mostrato in fig. 88b.
4. I diamanti sono posizionati in modo che la sezione trasversale rimossa da ogni pietra sia un massimo per la profondità prefissata.
5. Lo scalpello lavora alla profondità di scavo progettata.
6. L'idraulica dello scalpello sia sufficiente per un'ottima pulizia del fondo del foro.

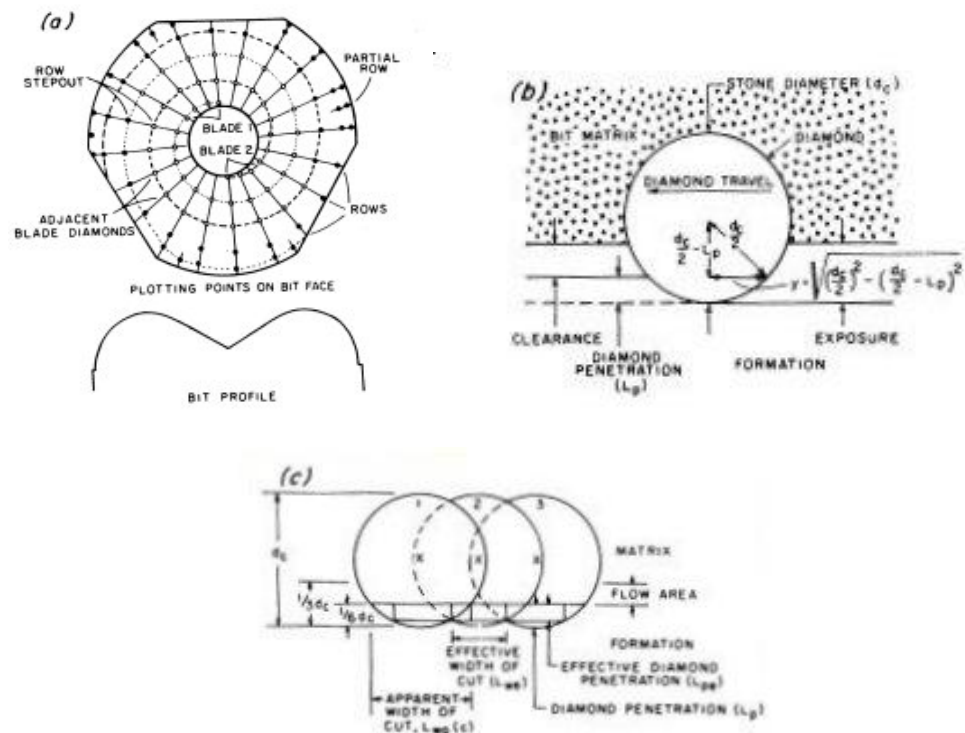


Figura 88 - Schema della punta diamantata assunta nella equazione della velocità di penetrazione

In queste condizioni, l'effettivo avanzamento L_{pe} e l'effettivo numero di lame n_{be} sono dati da

⁹ McLamore, R.T.: "Che Role of Rock Strenght Anisotropy in Natural Hole Deviation", *J. Pet. Tech.* Nov.1971, *Trans.*, AIME, 251

$$L_{pe} = 0.67L_p$$

$$n_{be} = 1.92 \left(\frac{C_c}{S_d} \right) d_b \sqrt{d_c L_p - L_p^2}$$

dove

C_c = concentrazione dei taglianti di diamante

L_p = attuale profondità di avanzamento di ciascuna
pietra

d_b = diametro della punta

d_c = diametro medio della faccia tagliente della pietra

S_d = dimensione del diamante

Una proprietà della formazione chiamata *resistenza della formazione*, r_f , viene usata per calcolare il peso richiesto per ottenere l'avanzamento prefissato L_p . La *resistenza della formazione* è la pressione richiesta per superare la resistenza della formazione, permettendo al diamante di penetrare nella roccia.

$$r_f = \frac{W_e}{A_{dt}}$$

dove W_e è l'effettivo peso applicato alla punta dopo aver considerato le forze idrauliche di pompaggio, e A_{dt} è l'area totale dei diamanti a contatto con la formazione. La r_f può essere valutata tramite la velocità di avanzamento osservata dopo che una punta abbia operato nella formazione di interesse.

Per una pietra sferica, come mostrato in figura 88b, l'area di contatto è data da

$$A_{dt} = \frac{\pi^2 d_b^2}{4} \left(\frac{C_c}{S_d} \right) (d_c L_p - L_p^2)$$

Le equazioni della velocità di avanzamento per scalpelli a rulli sono state proposte da vari autori. L'approccio usuale è quello di presupporre che gli effetti dovuti al peso della punta, alla velocità di rotazione, all'usura del tagliente, ecc. sulla ROP, sono tutti indipendenti l'uno dall'altro e che la somma degli effetti può essere valutata usando una equazione della forma

$$R = (f_1)(f_2)(f_3) \dots (f_n), \quad (\text{B-Y})$$

dove $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ rappresentano le relazioni funzionali tra la velocità d'avanzamento e le variabili di scavo. Le relazioni funzionali vengono scelte usualmente sulla base dei andamenti osservati sia in studi di laboratorio che di campagna. Alcuni autori hanno scelto di definire la relazione funzionale graficamente, mentre altri hanno usato tecniche di raccordo delle curve per ottenere espressioni matematiche empiriche. Sono state utilizzate alcune equazioni relativamente semplici che sfruttano solo due o tre variabili di scavo. Un esempio è l'equazione di Bingham definita prima.

Forse il modello matematicamente più completo che è stato usato è il modello di Bourgoyne e Young¹⁰. Essi hanno proposto l'uso di otto funzioni per modellizzare l'effetto della maggior parte delle variabili di scavo discusse precedentemente.

Nel modello di Bourgoyne-Young definito dalla equazione (B-Y), le relazioni funzionali sono le seguenti:

¹⁰ Winters, W. And Warren, T.M.: "Variations in Hydraulic Lift With Diamond Bits" documento SPE 11950 presentato alla conferenza tecnica annuale, San Francisco, 5-8 ottobre.

$$\begin{aligned}
 f_1 &= e^{2.303 a_1} = K \\
 f_2 &= e^{2.303 a_2 (10.000 - D)} \\
 f_3 &= e^{2.303 a_3 D^{0.69} (g_p - 9.0)} \\
 f_4 &= e^{2.303 a_4 D (g_p - \rho_c)} \\
 f_5 &= \left[\frac{\left(\frac{W}{d_b} \right) - \left(\frac{W}{d_b} \right)_t}{4 - \left(\frac{W}{d_b} \right)_t} \right]^{a_5} \\
 f_6 &= \left(\frac{N}{60} \right)^{a_6} \\
 f_7 &= e^{-a_7 h} \\
 f_8 &= \left(\frac{F_j}{1.000} \right)^{a_8}
 \end{aligned}$$

Dove

D = reale profondità del pozzo

g_p = gradiente della pressione dei pori

ρ_c = densità equivalente di circolazione

$\left(\frac{W}{d_b} \right)_t$ = soglia di peso, alla quale la punta comincia a scavare, sul

diametro della stessa punta

h = lentezza frazionaria del dente

F_j = forza idraulica d'impatto sotto lo scalpello

a_1, \dots, a_8 = costanti che devono essere scelte in base alle condizioni

locali di scavo.

Le costanti a_1, \dots, a_8 possono essere valutate usando dati di scavo precedentemente ottenuti qualora fossero disponibili. Il modello di scavo può essere utilizzato sia per calcoli di ottimizzazione dello scavo sia per la rilevazione della variazione della pressione dei pori.

La funzione f_1 esprime l'influenza della resistenza della formazione ed il tipo di scalpello. Inoltre include l'effetto di altre variabili come il tipo di fango, contenuto di solidi, ecc. che non sono compresi in forma esplicita nel modello di scavo. L'espressione esponenziale, per f_1 , è utile nell'applicare la tecnica di regressione multipla presentata da Bourgoyne e Young per valutare i valori da a_1 ad a_8 , tramite i dati ottenuti da perforazioni precedenti nella stessa area. Il coefficiente "2,303" permette alla costante a_1 di essere definita facilmente in termini di logaritmo decimale di una velocità di avanzamento osservata.

Le funzioni f_2 e f_3 modellizzano l'effetto del consolidamento sulla velocità di avanzamento. La funzione f_2 rappresenta l'incremento della resistenza della roccia dovuto al normale consolidamento con la profondità, e la funzione f_3 modella l'effetto del sotto-consolidamento sperimentato in formazioni pressurizzate in modo anomalo. Il prodotto (f_2f_3) è uguale a 1 per un gradiente di pressione equivalente a 9 lbf/gal ($107,84376 \cdot 10^2$ kg/m³) e ad una profondità di 10.000 ft (30.480 cm).

La funzione f_4 modella l'effetto dell'overbalance sulla ROP. Questa funzione ha valore 1 per *overbalance* nullo: per esempio, quando la pressione dei pori della formazione è uguale alla pressione di fondo foro del pozzo.

Le funzioni f_5 e f_6 modellizzano l'effetto del peso dello scalpello e della velocità di rotazione, sulla velocità di penetrazione. La f_5 ha valore unitario quando $\left(\frac{W}{d_b}\right)$ ha un valore 4.000 lbf/in. (7005,074 N/cm), mentre la f_6 ha valore 1 quando la velocità di rotazione assume il valore 60 rpm; questi valori sono stati scelti affinché il prodotto f_5f_6 avesse, a sua volta, un valore vicino a 1 per condizioni di scavo uguali. La soglia di peso sullo scalpello è spesso abbastanza piccola e può essere ignorata in zone come la costa del golfo statunitense del Messico dove le formazioni sono relativamente soffici. In formazioni più compatte, la soglia può essere stimata da test di *drilloff* portati a termine con pesi molto bassi. La funzione f_5 ha un limite superiore corrispondente al *flounder point* (punto di imballamento) dello scalpello, che deve essere stabilizzato dal test di *drilloff*. Anche le costanti a_5 e a_6 possono essere determinate dalla prova di *drilloff*.

La funzione f_7 modella gli effetti dell'usura dello scalpello sulla velocità di penetrazione. Il valore di a_7 può essere stimato dalle misurazioni della velocità di avanzamento presa in formazioni e condizioni di lavoro dello scalpello simili ad inizio e a fine corsa. Il termine f_7 , per usura dello scalpello nulla, ha valore 1. Quando gli inserti di tungsteno e carburo operano a peso e velocità di rotazione bassi, l'usura dei denti è irrilevante e questo termine può essere omissis. I tipici valori di a_7 , per taglienti fresati vanno da 0,3 a 1,5.

La funzione f_8 modella gli effetti dell'idraulica dello scalpello sulla velocità di avanzamento. La forza d'impatto del getto è stata scelta come parametro idraulico di interesse, con un valore da 1 a 1.000 lbf (4.448,2 N).

Come mostrato in figura 88, la scelta della spinta del getto è arbitraria. Risultati simili possono essere ottenuti considerando come parametri

idraulici la potenza idraulica oppure il numero di Reynolds per gli ugelli. Caratteristici valori di a_s sono compresi tra 0,3 e 0,6.

In pratica, è opportuno selezionare i valori medi migliori da a_2 ad a_8 per i tipi di formazione negli intervalli di profondità di interesse. Tuttavia il valore di f_1 varia con la resistenza della formazione che stiamo scavando. Il termine f_1 è espresso nella stessa unità di misura della velocità di avanzamento e che comunemente viene chiamata “*perforabilità della formazione*”. La perforabilità è, numericamente, uguale alla velocità di avanzamento del tipo di formazione in esame (in normali condizioni di consolidamento), operando con uno scalpello nuovo a zero *overbalance*, un peso dello scalpello di 4.000 lbf/in. (7.005,074 N/cm), una velocità di rotazione di 60 rpm, ed una profondità di 10.000 ft (3048 m). La perforabilità delle varie formazioni può essere valutata usando i dati di scavo ottenuti da pozzi precedenti nella stessa area.

6.6.1 Esperienze precedenti

Gli effetti della pressione di confinamento sulle proprietà delle rocce sono ben noti. Essa è direttamente proporzionale agli sforzi ed all'elasticità della roccia. I test di laboratorio in condizioni simulate di profondità reale, comparati con i risultati di campagna hanno dimostrato che la velocità di scavo può diminuire quasi del 80% ad alte pressioni nel foro. Questa diminuzione si ha perché l'alta pressione di fondo foro aumenta gli sforzi, la plasticità ed un'insufficiente pulizia dei detriti sul fondo. Finché questi effetti saranno collegati, sarà difficile annullare la loro influenza sulla diminuzione dell'efficienza dello scavo.

Un modello di prestazione totalmente teorico, per uno scalpello conico a rotazione, non è stato trovato a causa dei complessi fenomeni idraulici e meccanici coinvolti. Sono stati condotti alcuni test per trovare un'equazione su basi teoriche per la velocità di avanzamento. Per esempio, Gnirk e Cheatam si sono basati esclusivamente su studi indirizzati alle deformazioni plastiche, usando come uniche caratteristiche della roccia, gli sforzi sotto pressione e l'angolo d'attrito. Modelli come questi, generalmente, non considerano la complessità dei movimenti dei roller bit che normalmente dipendono da effetti idraulici. Il lavoro è stato effettuato sull'impiego di un modello cinematico di roller bit, ma l'applicazione è inadeguata a causa della complessità dei modelli.

Come detto all'inizio di questa trattazione, i modelli empirici, invece, si basano su dati di laboratorio o di campagna; normalmente usano o la costante di formazione oppure i coefficienti di resistenza degli sforzi della roccia. La maggior parte dei modelli empirici sviluppati precedentemente non includono gli effetti dovuti alla profondità ed alla pressione in-situ.

Considerevole attenzione è stata posta anche sullo sforzo in condizioni ambientali sul fondo del foro: per le rocce permeabili l'effettiva pressione di confinamento a fondo foro, è la pressione differenziale sul filtro del pannello di fango (cioè la differenza tra la pressione della colonna di fango e la pressione dei fluidi di perforazione).

Per rocce a bassa permeabilità, la pressione differenziale è sempre stata considerata uguale alla pressione del foro. Un recente studio ha tuttavia evidenziato che, nelle rocce a bassa permeabilità, ci sono variazioni di volume e quindi di pressione dei pori. Usando dei test a frattura triassiale in condizioni di sforzo, vengono messe in evidenza le eventuali variazioni del volume dei pori. Finché nei test di laboratorio ci saranno variazioni di pressione dei pori dovute alle variazioni di volume, mentre nelle prove di campagna queste differenze non verranno evidenziate, ciò significa che il problema sarà dovuto all'apparecchio e non alla roccia. Ciò dimostra ancora una volta l'importanza dell'effettuare le prove triassiali in condizioni di sforzo per ottenere risultati affidabili.

Le variazioni della resistenza della roccia in funzione della pressione di confinamento ed i cedimenti per sollecitazione di taglio, possono essere rappresentate tramite gli involuppi di Mohr. Un'approssimazione lineare del criterio di rottura di Coulomb dà un'approssimazione di questo cedimento per sforzo di taglio. Questa è l'intercetta della resistenza a cedimento della roccia ad una particolare pressione di confinamento con l'involuppo di Mohr. Può essere quindi determinato il corrispondente cedimento per sforzo di taglio in ogni condizione di sforzo. Ciò non comporta alcun incremento di contributo di sforzo da parte del dente di roccia.

Per ogni tipo di roccia è stata fatta un'analisi dell'ROP in funzione delle variabili indipendenti esaminate: WOB e pressione del foro. Le equazioni di previsione hanno tre forme caratteristiche diverse. Uno studio dei costituenti mineralogici e delle conseguenti caratteristiche di ogni tipo di roccia non rivelano alcuna proprietà fondamentale per dividere le rocce in queste stesse categorie. Ulteriori ricerche sulla natura dei minerali potrebbero determinare i motivi del comportamento così diverso che lo stesso scalpello nei tre tipi di roccia.

Il primo dei distinti gruppi include i calcari Lueders, l'argilla Mancos, l'arenaria Torrey Buffy. La ROP per ognuno di questi tipi di roccia può essere rappresentato dalla seguente espressione:

$$ROP = A+B*W+C*p+D*p^2$$

A, B, C, D = coefficienti

p = pressione del foro

W = W.O.B. (peso dello scalpello)

Il secondo gruppo consiste in dolomie di Bonne Terre e marmo di Carthage per i quali la ROP è dato dalla seguente formula:

$$ROP = A+B+W+C*(W*p)+D*p^2$$

In conclusione, il terzo gruppo consiste in arenarie di Crab Orchard e il basalto di John Day. In questo caso, la ROP è della seguente forma:

$$ROP = A+B+(W*p)+C*W^2$$

I coefficienti sono i seguenti:

rock type	Coefficiente di correlazione	A	B	C	D
calcare di Lueders	.95	53	43	-92	57
calcare di Mancos	.94	51	40	-163	102
arenaria di Torrey Buff	.97	44	50	-100	57
dolomie di Bonne Terre	.95	2	53	-24	10
marmo di Carthage	.93	-7.6	67	-67	20
arenarie di Crab Orchard	.83	9	-37	36	9
basalto di John Day	.90	4	-38	38	10

L'esame della tabella mostra la somiglianza dei coefficienti all'interno di ogni gruppo.

La rappresentazione della resistenza della roccia come funzione della pressione di confinamento è dato dagli involucri di Mohr. La resistenza a compressione in-situ può essere approssimata come già detto in precedenza al criterio di rottura di Mohr Coulomb. L'involuppo può essere scritto come segue:

$$\tau_0 + p \tan \theta$$

$$\sigma_c = p + 2$$

$$\cos \theta - \tan \theta + \sin \theta - \tan \theta$$

θ = angolo di attrito interno

σ_c = resistenza a compressione in-situ

p = pressione del foro

In conclusione di questo argomento, possiamo affermare che un'equazione che preveda la ROP per uno scalpello conico a rotazione, quando l'involuppo di Mohr non è disponibile, è determinata come funzione del WOB, della profondità del foro e della resistenza a compressione in-situ. E' stato dimostrato che i livelli di energia idraulica dello scalpello assumono una importanza tale da far passare in secondo piano la pulizia dello scalpello stesso.

6.6.2 Un'ulteriore teoria per la previsione della velocità di avanzamento: le reti neurali

Il successo e quindi l'economia di un'operazione di scavo, dipendono dalle condizioni dello scalpello. Con prestazioni dello scalpello ad alte velocità, i costi di scavo diminuiranno. Quindi la scelta di un appropriato scalpello e di opportuni parametri di operazione sono importanti discriminanti durante le operazioni di scavo. Il lavoro effettuato da parecchi ricercatori ha mostrato che molti scalpelli e componenti fluidi influenzano la velocità di avanzamento. Un passo ulteriore è costituito dalle *reti neurali*: esse sono state applicate a vari campi con successo grazie alla loro capacità di identificare complesse relazioni con pochi dati. Recentemente sono state applicate in diversi settori dell'ingegneria petrolifera come in tubi di flusso multifase, gestione dei serbatoi, produzione e scavo.

Le reti neurali, sviluppate per individuare la punta dello scalpello, hanno utilizzato sei parametri di input: litologia (o tipo di formazione), torsione, ROP, velocità di rotazione, WOB e potenza idraulica per pollice quadrato dell'ugello. La rete viene addestrata per prevedere l'usura dello scalpello come output.

7 Carotieri e campionatori meccanici

Nelle indagini del sottosuolo condotte mediante perforazioni, riveste particolare importanza il prelievo di campioni di terreno da sottoporre a quegli esami che l'indagine di volta in volta richiede. In ogni caso, quindi, i campioni debbono essere rappresentativi delle formazioni nelle quali sono stati prelevati.

Come è noto, gli ammassi rocciosi presentano caratteristiche fisico-meccaniche, litologiche, strutturali ed idrauliche le più disparate. Si va, infatti, dai terreni sciolti (coerenti e non) alle rocce lapidee, dalle formazioni relativamente omogenee a quelle formate da un succedersi capriccioso di strati di natura e consistenza diverse, da ammassi asciutti ad acquiferi a differente permeabilità.

E' noto, inoltre, a chi opera in questo settore, quale influenza hanno queste diverse caratteristiche dell' ammasso roccioso sulla perforazione in genere e sul prelievo di campioni in particolare.

7.1 Scopi principali del prelievo di campioni

Il prelievo di campioni nei fori perforati, cioè il cosiddetto "carotaggio meccanico", viene eseguito principalmente e più frequentemente per i seguenti scopi:

- studi stratigrafici, litologici, petrografici, paleontologici;
- studi di carattere minerario (studio delle mineralizzazioni, valutazione dei tenori e delle riserve di minerale, ecc.);
- determinazione della permeabilità e della porosità degli ammassi;
- determinazione delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni.

Per operare correttamente e per ottenere risultati attendibili, è necessario impiegare, di volta in volta, tecniche ed attrezzature che meglio si addicono al terreno da campionare.

Particolare cura richiede il prelievo dei cosiddetti campioni "indisturbati" di terreno da sottoporre a prove geotecniche di laboratorio, in quanto l'operazione deve essere eseguita in modo da ottenere campioni che conservino, il più possibile inalterate, le caratteristiche del terreno in "situ". Campioni di questo tipo vengono, non di rado, prelevati in terreni di scarsa consistenza che presentano notevoli difficoltà di campionamento per cui è necessario ricorrere a tecniche e ad attrezzature particolari.

In qualunque operazione di "carotaggio" riveste, inoltre, importanza particolare il "recupero", cioè il rapporto fra la lunghezza di "carota" prelevata e la lunghezza del tratto perforato.

Un esempio per tutti può chiarire questa importanza.

Nel campionamento di formazioni caratterizzate dal succedersi, in sottili strati, di terreni lapidei e di terreni a bassa resistenza a taglio, se la perforazione non è condotta in maniera adeguata, possono essere recuperati campioni costituiti esclusivamente da frammenti della frazione lapidea, essendo stata completamente disgregata la parte più friabile. In casi del genere, se non si tiene conto del recupero di carotaggio, si potrebbe essere erroneamente indotti a ritenere che il sotto suolo, nel tratto carotato, sia costituito esclusivamente da materiale lapideo.

7.2 Principali tipi di carotieri meccanici di fondo

Il carotiere è un particolare utensile di perforazione che consente di isolare un "nucleo" di terreno (detto comunemente "carota") e di portarlo in superficie. Si tratta, cioè, di un attrezzo cavo, munito alla base di una corona tagliente e nel cui interno trova alloggio la "carota" man mano che viene isolata dal terreno.

Per il trasporto della carota in superficie i carotieri debbono essere muniti di dispositivi atti a trattenerla all'interno dopo essere stata staccata dal fondo.

A seconda delle caratteristiche costruttive esistono due tipi di carotieri meccanici di fondo: carotieri semplici e carotieri doppi.

7.2.1 Carotiere semplice

Il carotiere *semplice* è costituito da un unico tubo che penetra nel terreno ed isola la "carota". Di questi carotieri ne esistono tre tipi che si differenziano fra loro per il modo con il quale penetrano nel terreno e precisamente:

- *carotiere a pressione* che penetra nel terreno sotto l'azione di un carico statico;
- *carotiere a percussione* che penetra nel terreno sotto l'azione di un carico dinamico (urti);
- *carotiere a rotazione* che penetra nel terreno per azione di rotazione e sotto carico statico.

A questi tre tipi se ne deve aggiungere un altro che si può definire "combinato" in quanto la "carota" viene prelevata per azione simultanea di un carotiere semplice che penetra a pressione o a percussione e di uno, pure semplice, che penetra per rotazione.

I carotieri a pressione o a percussione isolano la carota per *costipazione* di un anello di terreno. I carotieri a rotazione la isolano *asportando* una corona di terreno e ciò implica l'allontanamento continuo dei detriti,

operazione che avviene o mediante una corrente di fluido (aria, acqua, fango) o con sistema meccanico (aste elicoidali).

Ne deriva che i primi due tipi sono impiegabili soltanto in terreni costipabili e deformabili, il terzo in tutti i tipi di terreno (salvo quanto si dirà in seguito).

7.2.1.1 Carotieri a pressione e a percussione

Questi carotieri sono costituiti da un tubo alla cui base è montata una corona tagliente a profilo continuo.

Nei carotieri a pressione il carico statico è fornito dalla colonna di perforazione attraverso la quale, negli impianti muniti di "pull-down", è possibile trasmettere anche una parte del peso dell' impianto stesso. La penetrazione del carotiere avviene sia per traslazione delle aste verso il basso, sia ad aste ferme e con avanzamento del carotiere mediante azione idraulica.

Nei carotieri a percussione l'utensile è appoggiato sul fondo del foro e riceve una serie di urti da una massa battente cilindrica di ferro lasciata cadere ritmicamente, da una certa altezza, sulla testa del carotiere stesso.

Negli impianti a rotazione, per prelevare un campione a percussione la massa battente è spesso costituita dalle aste anche se ciò rappresenta una tecnica non corretta. E', infatti, preferibile trasmettere l'urto con una massa concentrata per evitare dispersioni di energia, inflessione delle aste e disturbi al campione dovuti a questa deformazione.

I carotieri a pressione e a percussione possono essere impiegati soltanto per il prelievo di campioni in terreni compressibili e deformabili. I migliori risultati si ottengono con i carotieri a pressione in quanto quelli a percussione possono alterare anche notevolmente alcune caratteristiche del terreno.

Nella Fig. 89 è illustrato, schematicamente, l'effetto che la penetrazione di un carotiere produrrebbe sul campione qualora non fosse munito di corona tagliente opportunamente profilata.

Nella fase iniziale dell' infissione il carotiere spiazza un volume di terreno definito dal proprio diametro esterno e dall' altezza h di penetrazione (volume ABCD). Il volume disponibile per la carota, è, però, funzione del diametro interno del carotiere, per cui il suddetto volume andrà ad occupare il volume A'B'C'D' e la lunghezza di carota risulterà h' maggiore di h . Si avrà, cioè, un "recupero" maggiore di 1. Inevitabilmente l'ingresso della carota nel carotiere è accompagnata da rifluimento di terreno verso l'interno.

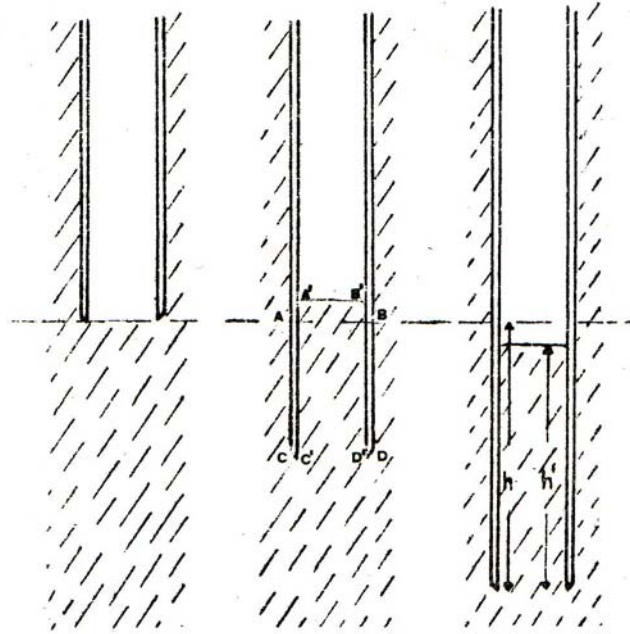


Figura 89 – Errata penetrazione del carotiere

Con il procedere della penetrazione del carotiere nel terreno, l'attrito fra la carota e la superficie interna del carotiere può raggiungere valori tali per cui la carota stessa è trascinata verso il basso e tende a subire una compressione. La sua lunghezza h' potrà, quindi, risultare minore della penetrazione h del carotiere nel terreno.

Il disturbo che può subire un campione di terreno nell'operazione di prelievo è messo bene in evidenza dai risultati di prove di compressione semplice eseguite da Hvorslev su provini prelevati lungo l'asse di una stessa "carota" (Fig. 90).

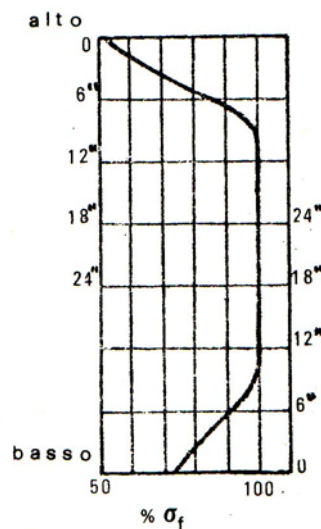


Figura 90 – Variazione della resistenza a compressione semplice lungo l'asse della stessa carota

Per evitare o ridurre il rifluimento di terreno verso l'interno è necessario che un carotiere a pressione o a percussione sia munito di tagliente avente superficie esterna tronco-conica ed interna cilindrica, il quale isola la carota costipando il terreno verso l'esterno ed evitando, nel con tempo, rifluimenti verso l'interno.

Per evitare, o quantomeno ridurre, la costipazione della carota per trascinamento verso il basso è opportuno che il diametro interno del tagliente sia minore del diametro interno del carotiere.

In questo modo, però, se da un lato si riduce l'attrito fra campione e carotiere, dall' altro si consente alla carota di rilasciarsi.

Nei carotieri per il prelievo di campioni cosiddetti "indisturbati", per ridurre al minimo il "disturbo" che l'operazione di prelievo produce inevitabilmente sul campione, è opportuno che il carotiere sia realizzato rispettando alcuni coefficienti che legano i diametri interno ed esterno del corpo del carotiere e del tagliente e precisamente (Fig. 91).

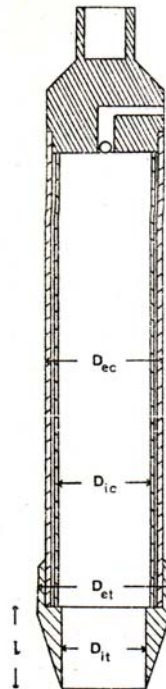


Figura 91 – Relazione tra i diametri di un carotiere tipo

coefficiente di entrata

$$C_e = \frac{D_{ic} - D_{it}}{D_{it}} 100$$

coefficiente di penetrazione

$$C_p = \frac{D_{et} - D_{ec}}{D_{ec}} 100$$

coefficiente di parete
$$C_a = \frac{D_{et}^2 - D_{it}^2}{D_{it}^2} 100$$

Il valore di C_e può variare fra 0.5% e 1.5% a seconda della natura del terreno. In alcuni casi si possono tollerare anche valori del 3%, ma sono da evitare valori superiori per non consentire un eccessivo allentamento del campione. Valori inferiori allo 0.5% possono essere ammessi per carote molto corte e per terreni con bassissimo angolo di attrito interno.

Valori di $C_e = 0$ sono richiesti per il prelievo di campioni "indisturbati" in terreni poco addensati e scarsamente attritivi.

Il valore di C_p dovrebbe risultare nullo per terreni dotati di scarsa consistenza e non dovrebbe, comunque, mai superare il 2% per evitare, o quanto meno ridurre, i rifluimenti del terreno durante la penetrazione del carotiere.

Il coefficiente C_a dovrebbe essere compreso entro il 10-15 % per rendere trascurabile, rispetto al volume teorico interno del carotiere, l'eccesso di terreno penetrato in esso. Quando non è possibile, per ragioni costruttive, mantenere C_a entro questi valori, occorre munire il carotiere di un tagliente molto lungo ed affilato.

Il diametro dei campioni "indisturbati" varia comunemente fra 60 e 150 mm; la lunghezza non supera, di solito, i 70-80 cm, per evitare l'azione di costipazione durante la penetrazione del carotiere. Per questo motivo, nei terreni attritivi, i campioni debbono essere corti. Altro fattore molto importante nel prelievo di campioni "indisturbati" è la velocità di penetrazione dell' utensile. Maggiore è questa velocità, migliori sono i risultati.

I carotieri per il prelievo di campioni "indisturbati" sono muniti di una custodia (di plastica rigida o di lamiera zincata) posta all'interno del carotiere e nella quale penetra il campione che, così protetto, può essere facilmente estratto dal carotiere senza subire deformazioni. Previa chiusura ermetica di questo contenitore, il campione viene inviato al laboratorio di analisi. Per ridurre al minimo il coefficiente di parete (carotieri a parete sottile) è necessario rinunciare alla custodia interna, affidando la sua funzione allo stesso carotiere.

Durante la fase di sollevamento verso la superficie la carota contenuta nel carotiere è sollecitata dalle seguenti forze:

- forza peso, (P) che tende a farla uscire;
- forza derivante dall'attrito laterale sulle pareti del carotiere (A) che tende a trattenerla.

Nel caso di foro asciutto il campione rimarrà all'interno del carotiere se $A > P$. In presenza di liquido nel foro, alle precedenti forze se ne aggiungono altre due e precisamente:

- la forza dovuta alla pressione del liquido agente sulla faccia superiore della carota (F_1), forza che tende a far uscire il campione dal carotiere;
- la forza dovuta alla pressione del liquido che agisce sulla faccia inferiore della carota (F_2) e che si oppone all'uscita di questa.

Pertanto, in presenza di liquido, il campione rimarrà all'interno del carotiere se

$$A + F_2 > P + F_1 \quad (7.1)$$

Durante la risalita del carotiere verso la superficie la F_1 diminuisce progressivamente. La forza F_2 è funzione della velocità di risalita del carotiere, della differenza di diametro fra questo ed il foro, della viscosità del liquido, della lunghezza del carotiere. Infatti, ammettendo, per semplicità, che il foro sia perfettamente stagno e che il livello del liquido si mantenga sempre alla stessa quota nel foro, durante la risalita del carotiere il volume di liquido "spiazzato" dal carotiere stesso deve passare al disotto di esso attraverso lo spazio anulare carotiere-foro. In questo condotto il liquido in movimento incontra perdite di carico che sono funzione dei parametri suddetti. Per vincere queste perdite di carico dovrà stabilirsi un salto di pressione fra le sezioni estreme del carotiere.

Se, in prima approssimazione, si assume costante la pressione sulla sezione superiore, questo salto di pressione si instaurerà soltanto se diminuisce la pressione in corrispondenza della sezione inferiore.

Ciò porta, nell'espressione, una diminuzione del primo termine per cui potrebbero verificarsi le condizioni che favoriscono l'uscita del campione dal carotiere.

Per trattenere la carota nel carotiere si può intervenire in due modi: o per via meccanica o cercando di modificare F_1 ed F_2 .

L'intervento per via meccanica consiste nel montare, alla base del carotiere, uno "strappacarote" del tutto simile al "fermacarote" dei carotieri doppi (di cui si dirà in seguito) (Fig. 92), che porta una serie di sottili molle ricurve verso l'interno e rivolte verso l'alto. Quando il carotiere scende, le molle si aprono e fanno entrare la carota rimanendo aderenti ad essa. In fase di risalita, se la carota tende a scendere, le molle si chiudono verso l'interno e impediscono la fuoriuscita del campione.

Lo strappacarote meccanico, per il suo ingombro, può essere montato soltanto in quei carotieri che hanno una corona tagliente di un certo spessore, cioè dove C_a può essere elevato.

Nei carotieri a parete sottile, ed in particolare in quelli per prelievo di campioni "indisturbati", non è possibile montare lo strappacarote meccanico per cui è necessario intervenire su F_2 e/o su F_1 .

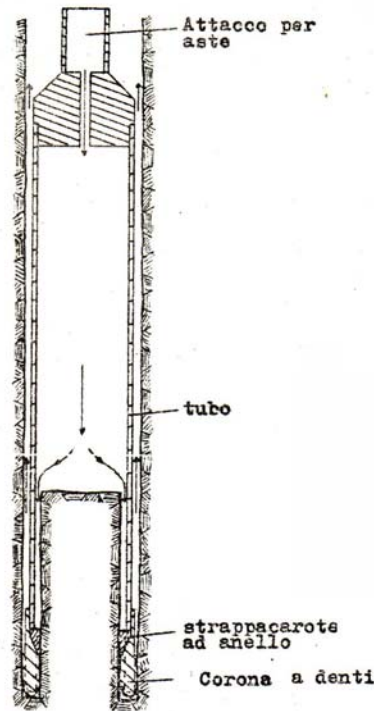


Figura 92 – Schema di carotiere con strappacarote

Su F_2 si può intervenire riducendo la velocità di sollevamento del carotiere, specialmente nel tratto corrispondente alla lunghezza di infissione. Nel tratto superiore si può intervenire adottando un diametro del foro superiore a quello del carotiere. La velocità di risalita ha però un limite inferiore dettato da ragioni economiche.

Su F_1 si può intervenire isolando lo spazio al disopra della carota dall'esterno del foro. Poiché la carota, aderendo, in tutto o in parte, alla superficie interna del carotiere, crea una chiusura idraulica, è necessaria, nella parte superiore del carotiere, un'apertura che permetta l'uscita del liquido nella fase di penetrazione del carotiere. Questa apertura si deve, però, chiudere automaticamente non appena inizia l'operazione di recupero in modo che, se la carota scorre verso il basso, si generi, nello spazio ad essa sovrastante, una forte diminuzione di pressione ed una pari diminuzione della forza F_1 . In queste condizioni diminuisce il secondo termine della (7.1) e, quindi, si favorisce la ritenuta del campione nel carotiere.

Le condizioni di cui sopra si realizzano montando una valvola automatica che mette in comunicazione l'interno del carotiere con l'esterno e che consente la fuoriuscita del liquido ma non l'ingresso.

Per evitare che, durante la discesa, il carotiere si riempia di materiale, l'utensile è chiuso, in basso, con un "pistone" (di legno, di plastica, di gomma) che può essere del tipo mobile, fisso o retrattile.

Il pistone mobile viene fissato con molle o rivetti che si rompono quando l'utensile penetra nel terreno cosicché il pistone rimane appoggiato sulla parte superiore della carota e penetra con essa nel carotiere.

Il pistone fisso è solidale con un sistema di aste e preme sulla carota mentre il tubo carotiere penetra nel terreno.

Il pistone retrattile viene sollevato prima che il carotiere penetri nel terreno.

Si descrivono, qui di seguito, alcuni fra i più comuni tipi di carotieri semplici a pressione e a percussione.

Carotiere di Mohr - Si tratta di un utensile del tutto simile a quello schematizzato nelle Figg. 93 e 94 nel quale può essere montato uno strappacarote ad alette incernierate, la cui chiusura è comandata dall'esterno mediante un filo metallico. Tirando questo filo si chiude lo strappacarote e si taglia il campione alla base. Questo campionatore è munito di una custodia interna suddivisa in tronchi contigui, ciascuno della lunghezza di circa 30 cm e di valvola automatica superiore. In assenza di strappacarote, può essere iniettata, al di sotto della carota, aria compressa per contenere la diminuzione di pressione che si genera nella fase di risalita, e, quindi, per aumentare F_2 nella 7.20.

Il tagliente è avvitato al corpo del carotiere e su di esso è bloccato il pistone. L'utensile può penetrare nel terreno sotto carico statico o dinamico.

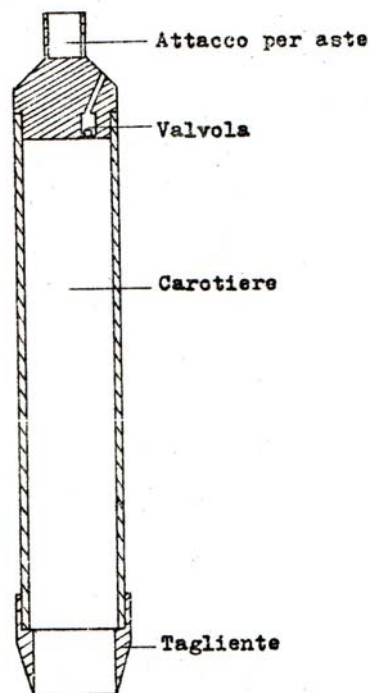


Figura 93 – Carotiere di Mohr

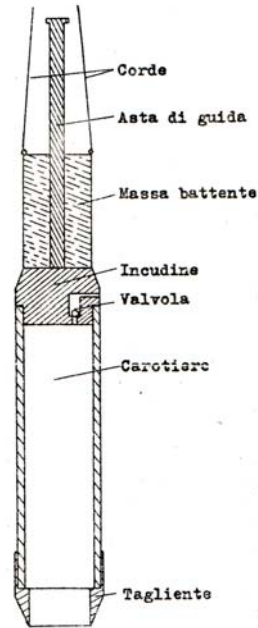


Figura 94 – Altro tipo di carotiere di Mohr

Carotiere di Lange - Esso è del tutto simile a quello di Mohr, ma è di questo più semplice, mancando lo strappacarote, il filo di acciaio, ed il tubo per l'aria compressa. Anche questo tipo di carotiere deve essere munito superiormente di valvola a chiusura automatica e può avere alla base il pistone mobile.

Carotiere Shelby - E' un carotiere in parete sottile, particolarmente impiegato per il prelievo di campioni "indisturbati" in terreni di scarsa consistenza. Per ottenere il minimo valore di C_a il tagliente è ricavato direttamente nel corpo del carotiere (Fig. 95).

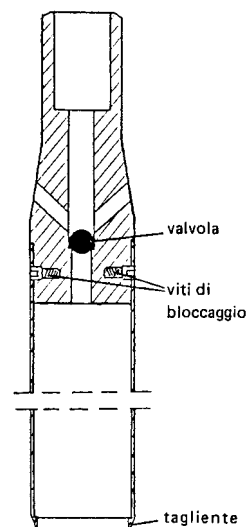


Figura 95 – Carotiere Shelby

Carotiere a pistone fisso - Di questo tipo di carotiere, che può operare soltanto sotto carico statico, ne esistono due versioni: una meccanica (ormai raramente usata) ed una idraulica.

Il tipo meccanico è comandato da due batterie di aste coassiali. Quella interna ha filettatura sinistra e comanda il pistone. Quella esterna, a filettatura destra, comanda il carotiere. Il pistone, nella fase di discesa nel foro, è fissato al carotiere mediante una filettatura sinistra (Fig. 96).

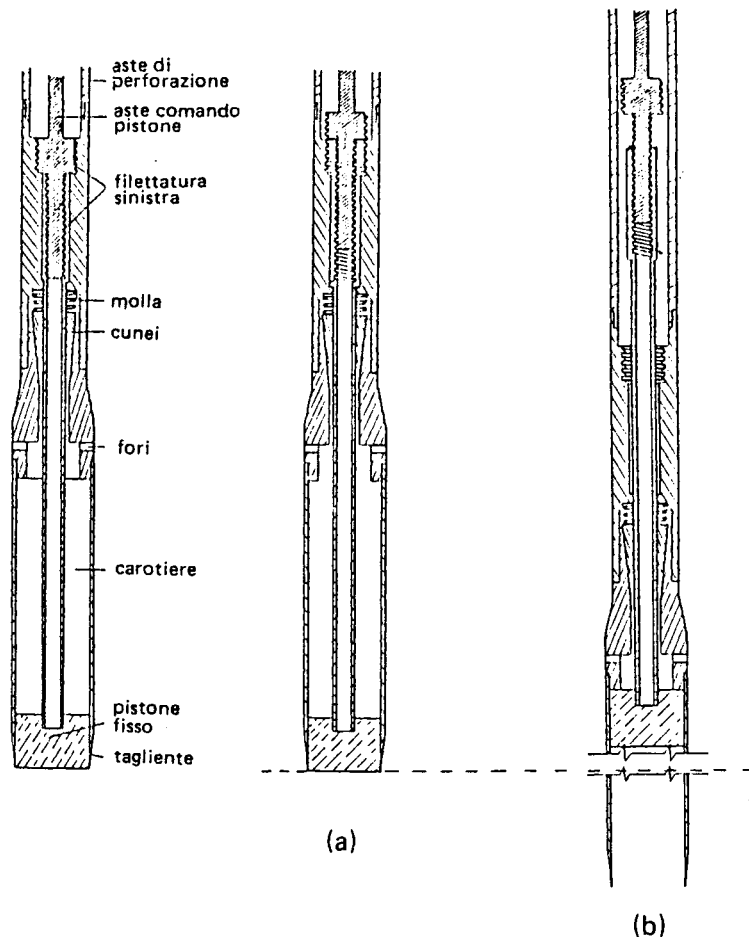


Figura 96 – Funzionamento di un carotiere a pistone fisso

Quando il carotiere ha raggiunto il fondo del foro (Fig. 96a), ruotando a sinistra le aste interne, si svincola il pistone dal carotiere (Fig. 96b) cosicché questo può penetrare nel terreno sotto un carico esercitato dalle aste esterne.

Il tipo idraulico, (*carotiere di Osterberg*), è costituito da due tubi concentrici (Fig. 97a) di cui quello esterno è solidale con le aste e funge da camera di un cilindro nel quale si muove, spinto dal liquido in pressione, un pistone solidale con il carotiere vero e proprio. Questo pistone, forato al centro, scorre su un tubo collegato rigidamente alle aste, alla cui estremità è montato il pistone fisso. Questo tubo porta, verso la base, due fori, a diversa altezza, per lo smaltimento del liquido nella fase di discesa del pistone (Fig. 97b) e per lo scarico delle pressioni quando il pistone mobile è

giunto, a fine corsa, a contatto con quello fisso (Fig. 97c). La presenza del pistone fisso non richiede la valvola automatica.

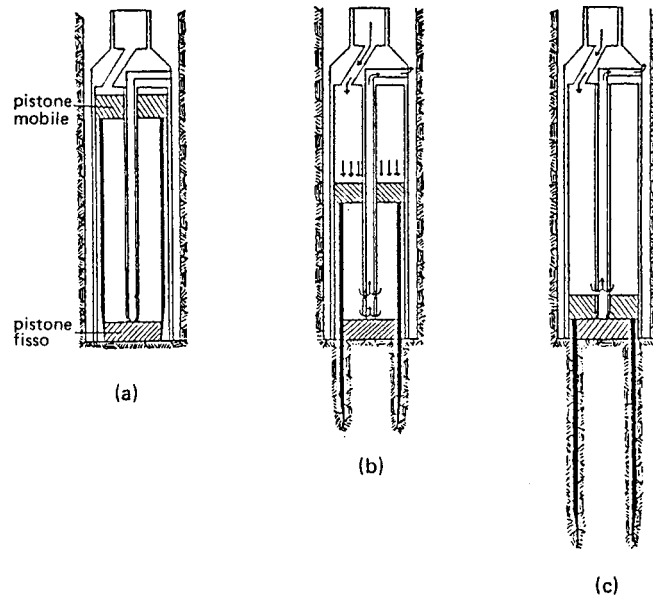


Figura 97 – Fasi di discesa del carotiere di Osterberg

Carotiere a pistone retrattile (tipo Porter) - Questo tipo di carotiere bene si presta per il campionamento in terreni facilmente deformabili. Il tubo carotiere, solidale con le aste, è chiuso, alla base, nella fase di discesa, da un pistone a forma di ogiva (Fig. 98) che ne facilita la penetrazione e che è collegato ad astine interne alle precedenti.

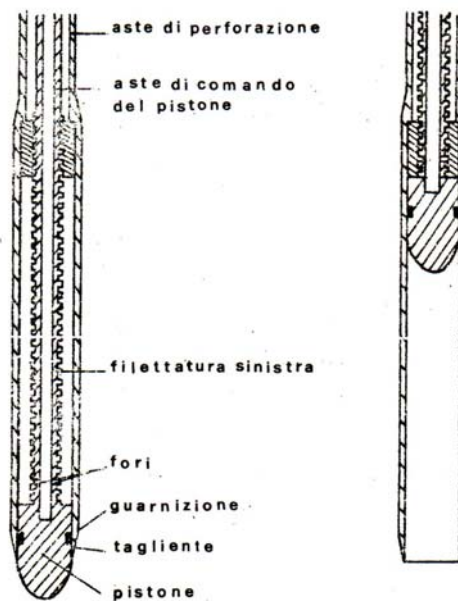


Figura 98 – Schema di carotiere tipo Porter

Raggiunta la profondità di campionatura, ruotando a sinistra queste astine, si libera il pistone dal carotiere che può così penetrare, sotto carico statico, per il prelievo del campione.

Carotiere di Bishop - Si tratta di un carotiere particolarmente adatto al prelievo di campioni in terreni sciolti incoerenti saturi di acqua ed a permeabilità non molto elevata. Esso utilizza aria compressa per impedire che il campione si disgreghi durante la manovra di risalita. L'aria compressa, immessa dall' esterno, si dispone al disotto della carota isolandola dall' acqua; si generano, così, nella parte inferiore del campione, tensioni capillari che conferiscono al terreno sciolto una coesione apparente. Il carotiere è costituito da un campionatore solidale con le aste, posto all'interno di un tubo (Fig. 99) che è, invece, scorrevole rispetto a queste. La valvola di chiusura automatica è costituita da una membrana di gomma che, sotto l'azione della pressione dell' aria compressa, va a chiudere il foro posto alla sommità del campionatore. In Fig. 99 sono indicate, schematicamente, le fasi operative.

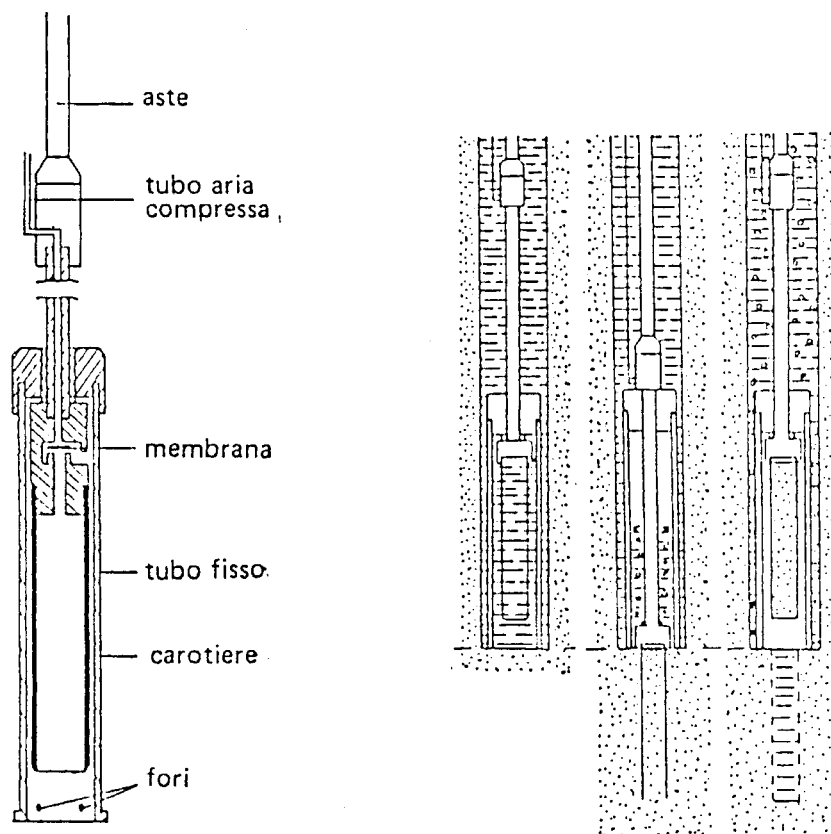


Figura 99 – Carotiere Bishop

Raggiunto il fondo del foro, il campionatore viene prima spinto nel terreno e poi ritirato entro il tubo esterno che, in questa operazione, è rimasto appoggiato sul fondo. Si immette, quindi, aria compressa per espellere l'acqua dal tubo esterno ed in queste condizioni rimane nel campione

soltanto l'acqua interstiziale che, con la sua tensione superficiale, conferisce al terreno una coesione apparente. Nel contempo il foro posto alla sommità del carotiere viene chiuso dalla membrana di gomma deformata dall'aria compressa.

Carotieri per il prelievo di campioni rimaneggiati - Questi carotieri sono impiegati per prelevare campioni rimaneggiati a modeste profondità. Essi possono essere azionati a mano o con motore e sono disponibili in forme diverse (Fig. 100) ciascuna delle quali, meglio delle altre, si presta al tipo di terreno da prelevare.

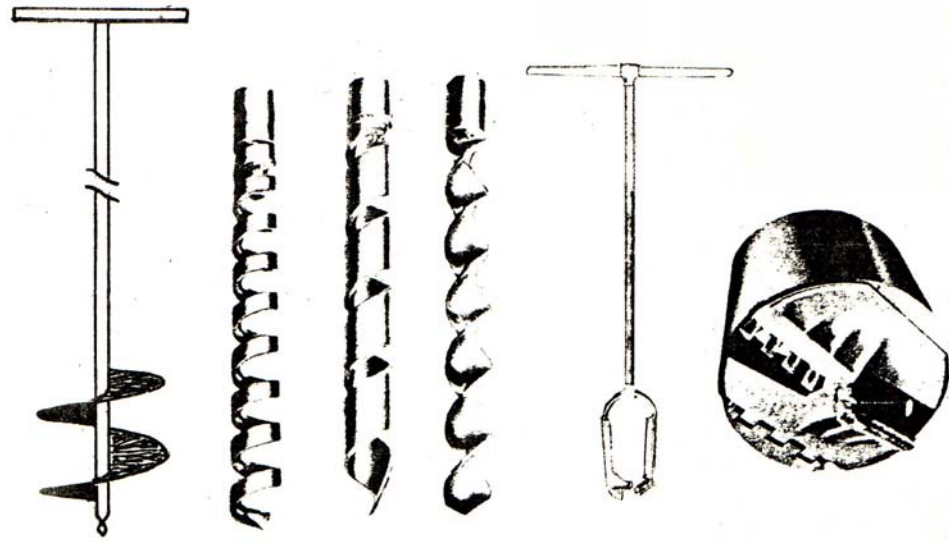


Figura 100 – Esempi di carotieri per campioni rimaneggiati

7.2.1.2 Carotiere semplice a rotazione

Il carotiere semplice a rotazione è costituito da un tubo ruotante (Fig. 92) munito, nella parte inferiore, di una corona tagliente (a denti rivestiti di materiale duro, ad inserti, a diamanti) (Fig. 101) che asporta una corona di terreno ed isola la carota, la quale inevitabilmente viene a contatto con il tubo carotiere e durante la rotazione di questo subisce sollecitazioni di torsione ed usura. Inoltre il liquido di circolazione, se presente, lambisce il campione, in quanto percorre l'intercapedine tubo-carota. Per queste ragioni il carotiere semplice a rotazione è indicato per la perforazione di rocce coesive, non solubili in acqua e non facilmente disgregabili all'opera del liquido di circolazione. Si aggiunga che questo esercita, all'interno del carotiere, una pressione che, in presenza di rocce fratturate, tende a comprimere i frammenti di carota, favorendone il contatto con il tubo che ruota e, quindi, esaltando l'usura e la sollecitazione a torsione. A questo inconveniente si può ovviare, almeno parzialmente, operando a circolazione inversa.



Figura 101 – Carotiere semplice a rotazione

Per il recupero della carota viene impiegato un anello tronco-conico aperto, (Fig. 102) che può scorrere su una superficie di pari conicità. L'anello, allargandosi, consente alla carota di penetrare nel carotiere, ma quando questa, in fase di recupero, tende ad uscire, lo trascina verso il basso e lo fa scorrere sulla superficie tronco-conica, con conseguente serraggio sulla carota stessa. Condizione essenziale per il buon funzionamento di questo tipo di strappacarote è che il campione sia costituito da materiale che oppone una reazione all'azione di serraggio. In presenza di terreni sciolti difficilmente si realizza questa condizione per cui normalmente si ricorre alla perforazione degli ultimi 10-15 cm di carota senza circolazione cosicché questa si blocca sulla corona.

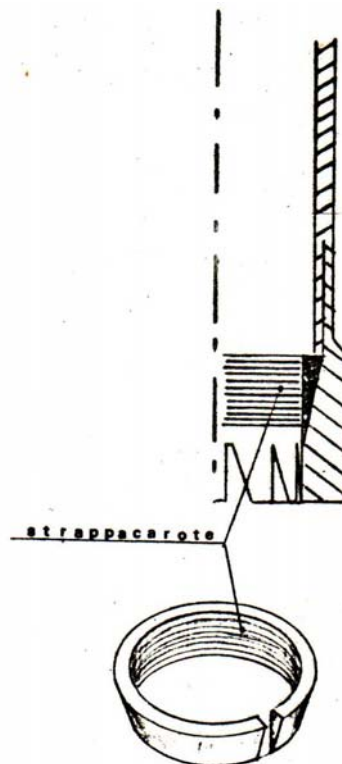


Figura 102 – Strappacarote con anello tronco-conico

Nella perforazione a rotazione con circolazione di liquido le condizioni di fratturazione del sotto suolo possono essere tali da dar luogo a perdite di circolazione così elevate da richiedere interventi di tamponamento onerosi o difficili per cui, in particolari condizioni, si può ricorrere all'impiego di un carotiere semplice a rotazione con calice (Fig. 103) nel quale la circolazione essenziale di liquido è limitata alla lunghezza dell' attrezzo. Questo è costituito da un carotiere semplice sormontato da un tubo aperto verso l'alto (calice). I detriti di perforazione (di solito minuti) vengono trasportati verso l'alto da una corrente di liquido che, data la ridotta superficie della sezione di deflusso, può assumere la necessaria velocità anche con una portata modesta. Raggiunta la sommità del carotiere, la sezione di deflusso aumenta rapidamente e, di conseguenza, la velocità di trasporto diminuisce bruscamente cosicché i detriti cadono nel "calice" (Fig. 104).

Per il funzionamento del carotiere a calice è, quindi, sufficiente che si instauri una corrente di liquido fra l'utensile di perforazione e la sommità del "calice". Poiché la portata di liquido è modesta, saranno basse le perdite di carico lungo il breve tratto di risalita per cui le perdite di circolazione potranno rimanere entro limiti economicamente accettabili.

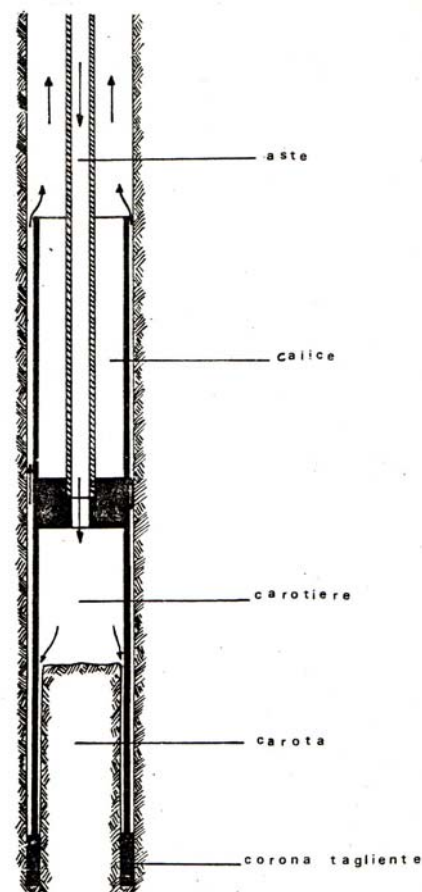


Figura 103 – Circolazione del fluido all'interno di un carotiere

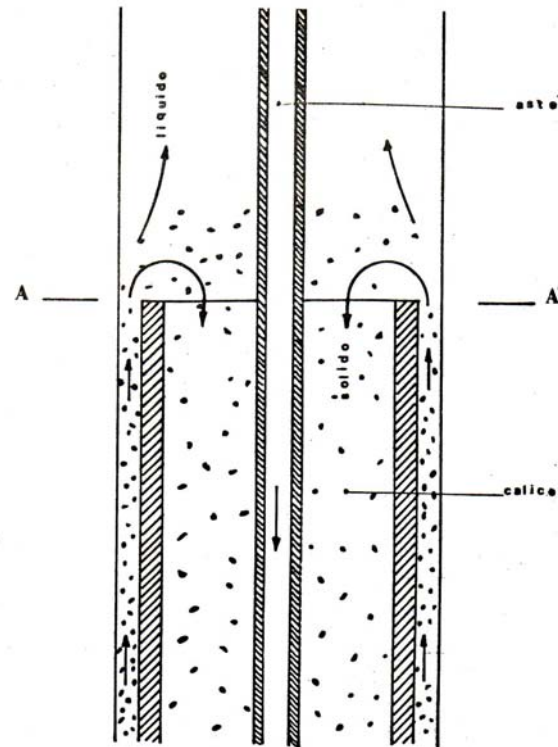


Figura 104 – Trasporto dei detriti per mezzo del fluido di circolazione

7.2.2 Carotiere combinato

Questi campionatori sono costituiti da un carotiere semplice a pressione o a percussione all'esterno del quale ruota un carotiere semplice a rotazione. Da qui il nome di carotiere "combinato" (Fig. 105).

Nel prelievo del campione il tubo interno si comporta come un carotiere semplice a pressione (o a percussione) e quello esterno come un carotiere semplice a rotazione.

Il tagliente del tubo interno sopravanza quello del tubo esterno sia per proteggere il campione dall'azione meccanica del tagliente ruotante, sia per evitare il contatto con l'eventuale fluido di circolazione. Questo tipo di carotiere trova impiego per il prelievo di campioni (anche "indisturbati") anche in terreni poco deformabili, nei quali l'infissione del comune carotiere semplice a pressione o a percussione richiederebbe carichi assiali molto elevati e non facilmente disponibili nella perforazione e, d'altra parte, l'impiego del solo carotiere semplice a rotazione provocherebbe forti disturbi al campione.

In ammassi di scadenti caratteristiche meccaniche è opportuno che il tagliente del tubo interno sopravanzi decisamente (anche di una decina di centimetri) quello del tubo esterno per proteggere il campione da disturbi che potrebbero essere arrecati durante il prelievo. D'altra parte questa elevata sporgenza è consentita dalla scarsa consistenza del terreno.



Figura 105 – Carotiere combinato

Man mano che aumenta la resistenza a taglio del terreno e diminuisce la sua deformabilità, il tubo interno avanza solo se viene rotto o deformato l'anello di terreno che si trova all'esterno del suo tagliente. In prima approssimazione, perché avvenga questa rottura è necessario che il tagliente tronco-conico che penetra a pressione sotto il carico P eserciti una spinta S superiore alla spinta passiva offerta dall'anello di terreno di altezza h . Ma tale spinta è funzione crescente di h e cioè della sporgenza del tagliente del tubo interno rispetto a quello del tubo esterno. Ne deriva che, con l'aumentare della resistenza a taglio del terreno, dovrà diminuire questa sporgenza, fino ad annullarsi.

La sporgenza del tagliente interno rispetto a quello esterno può essere regolata munendo il tubo interno di "scarpe" taglienti di lunghezza diversa (Fig. 106). Esiste anche un tipo di carotiere (carotiere Pitcher) (Fig. 107) nel quale la sporgenza è regolata automaticamente da una molla che fa avanzare o rientrare il carotiere interno in funzione della consistenza del terreno (Fig. 108).

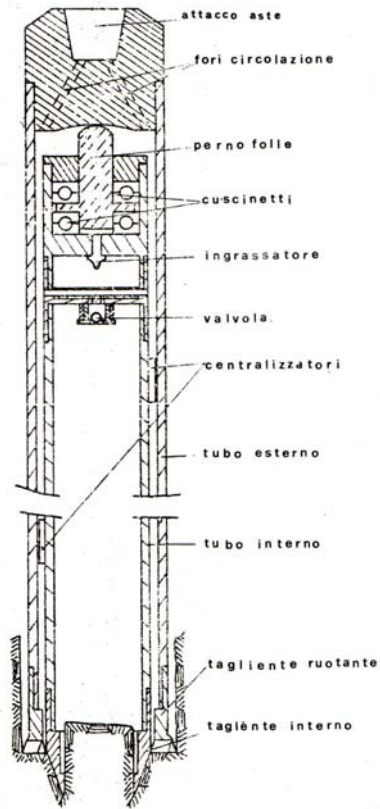


Figura 106 – Scarpe di diversa lunghezza

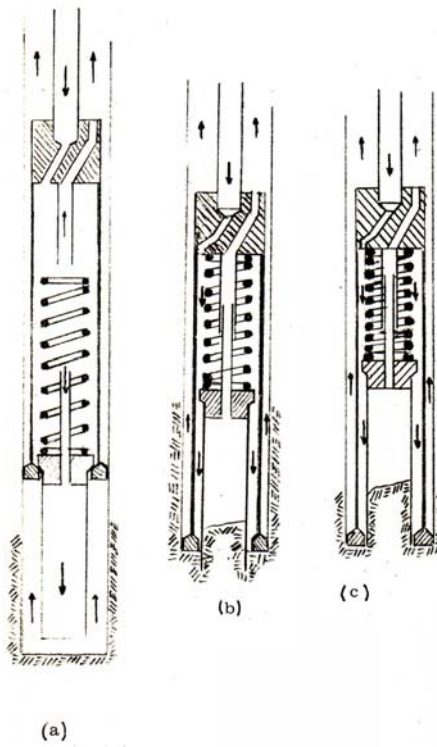


Figura 107 – Funzionamento del carotiere Pitcher

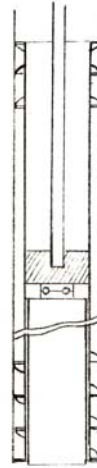


Figura 108 – Schematizzazione del carotiere Pitcher

7.2.3 Carotiere doppio

Questo tipo di carotiere è costituito da due tubi concentrici folli fra di loro (Figg. 109 e 110). La circolazione del fluido avviene nell'intercapedine fra i due tubi. Il tubo esterno ruota e porta alla base la corona tagliente. Il tubo interno, sospeso in alto a mezzo di cuscinetti, termina, in basso, in prossimità della corona tagliente. Alla sua base, e solidale con esso, è montato un "fermacarote" a molle, del tipo già descritto (Fig. 92), il quale, aderendo alla carota, dà origine ad una coppia resistente che si oppone al trascinarsi in rotazione del tubo interno. Al di sotto di questo fermacarote si trova, solidale con esso, lo "strappacarote" che può essere del tipo ad anello tronco-conico spaccato (Fig. 109) o a "coltelli" incernierati (Fig. 110).

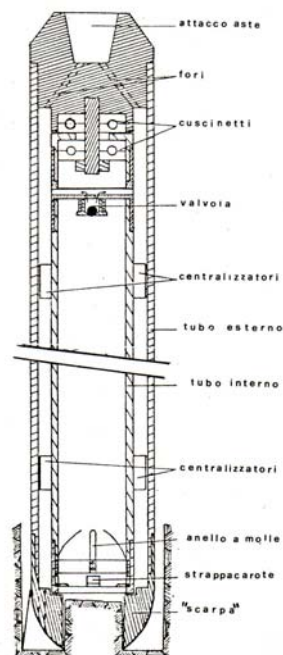


Figura 109 – Strappacarote ad anello tronco-conico spaccato

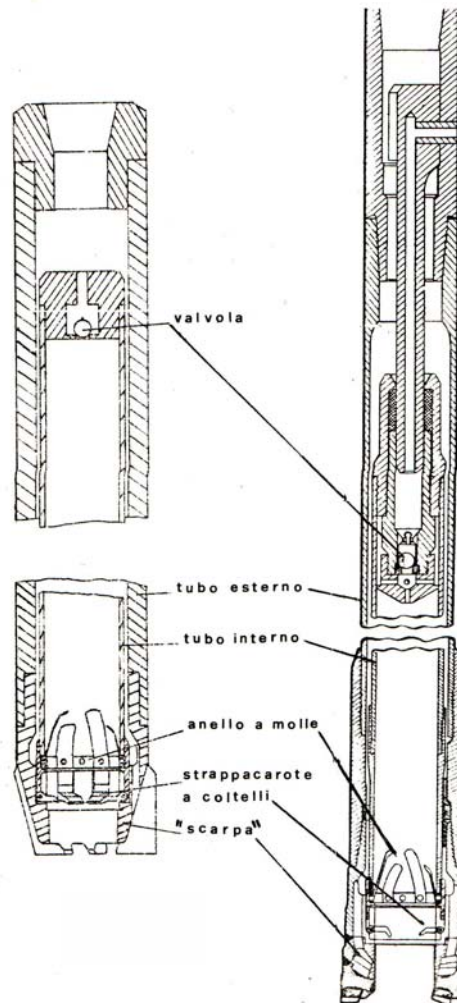


Figura 110 – Strappacarote a coltelli incernierati

Nel tubo interno può essere inserita una guaina (metallica o di plastica rigida) per facilitare l'estrazione del campione dal carotiere. In questi casi si parla, talvolta, di carotiere triplo, ma la dicitura può arrecare confusioni.

Durante l'operazione di carotaggio il campione è a contatto con la corona ruotante e con il liquido di circolazione, soltanto per il tempo occorrente per perforare il tratto compreso fra la base del tagliente e quella del tubo interno. Successivamente la carota entra nel tubo interno ed è da questo protetta sia contro l'azione meccanica del tubo esterno ruotante, sia contro quella del liquido di circolazione.

7.2.4 Carotiere wire-line

L'operazione di carotaggio meccanico richiede il sollevamento del carotiere dopo aver perforato un tratto di lunghezza pari alla capacità interna del carotiere stesso. Ciò comporta una "manovra" di risalita ed una di discesa della colonna di aste, manovra che è tanto più onerosa quanto maggiore è la profondità di prelievo del campione. Per ovviare a questo inconveniente e rendere meno costoso il prelievo di campioni, fu messo a punto, per la perforazione petrolifera, un tipo di carotiere doppio nel quale il tubo

interno, una volta riempito dal campione, poteva essere portato in superficie e ridisceso al fondo del foro mediante l'impiego di una corda (da qui il nome *wire-line*), con notevole risparmio di tempo.

In questo carotiere (Fig. 111) il tubo esterno è costituito da un tratto di asta pesante o di asta normale, nel quale opportuni dispositivi consentono al tubo interno di non essere trascinato in rotazione e di non traslare longitudinalmente. L'operazione di recupero e di messa in opera del tubo interno è eseguita con un particolare attrezzo, collegato ad una corda di acciaio, il quale comanda i dispositivi di bloccaggio e sbloccaggio.

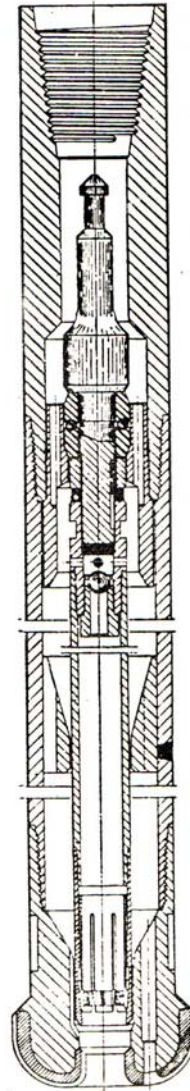


Figura 111 – Carotiere wire-line

L'utensile di perforazione è un normale scalpello che porta al centro un foro il cui diametro è quello della carota da prelevare. Alla base del tubo interno è montato lo strappacarote. Quando, dopo eseguito un carotaggio, si vuole riprendere la perforazione a distruzione totale, si scende il carotiere chiuso alla base con un utensile (a diamanti o a inserti), evitando, così, una manovra di aste per la sostituzione dello scalpello.

Questa tecnica è stata estesa anche alla perforazione di fori di modesta profondità e non di rado dà luogo a seri inconvenienti.

Normalmente i fori geognostici poco profondi vengono realizzati con diametri che non superano i 120 mm, per cui, per non ridurre il diametro della carota a valori troppo piccoli, vengono impiegati, come aste di perforazione, veri e propri tubi, di diametro esterno di poco inferiore a quello del foro.

Quando si tratta di perforare rocce lapidee, la portata di liquido può essere bassa (per le ridotte dimensioni ed il modesto volume di detriti prodotti nell'unità di tempo) per cui, se è modesta l'area dell'intercapedine tubo-foro, le perdite di carico nel circuito di ritorno non sono elevate. Ma in presenza di formazioni poco consistenti, la suddetta intercapedine tende facilmente a ridursi dando luogo a perdite di carico che possono raggiungere valori così elevati da annullare non solo il peso esercitato dalla colonna di tubi sull' utensile ma addirittura da provocare il sollevamento della colonna stessa. In questi casi il diametro di perforazione dovrebbe essere nettamente superiore al diametro esterno dei tubi in modo da consentire un facile deflusso del liquido verso la superficie.

8 *Fluidi di perforazione*

Nella perforazione a rotazione a circolazione diretta di fluido , il fango di perforazione viene pompato attraverso le aste fino allo scalpello per poi tornare in superficie percorrendo l'intercapedine aste-pareti del foro.

I fanghi di perforazione si prestano molto bene ad assolvere a tutte le funzioni che sono richieste a un fluido di perforazione.

8.1 **Funzioni di un fluido di perforazione**

I fanghi di perforazione o meglio i fluidi di perforazione devono svolgere le seguenti funzioni:

- Rimozione dei prodotti di perforazione dal foro , mantenimento in sospensione e rilascio in superficie degli stessi.
- Controllo delle pressioni di formazione.
- Stabilizzazione del foro.
- Supportare il peso del casing e della batteria di perforazione.
- Pulizia , raffreddamento e lubrificazione dello scalpello , delle drillpipe e delle drillcollar.
- Trasmettere potenza idraulica allo scalpello.
- Limitare la corrosione delle parti tubolari metalliche.
- Fornire informazioni sui terreni attraversati.
- Non devono essere danneggianti per la formazione produttiva e per l'ambiente.

8.1.1 **Pulizia del foro**

Una delle più importanti e primarie funzioni di un fluido di perforazione è la rimozione dei prodotti di perforazione dal foro . Il fluido fluisce attraverso gli ugelli dello scalpello esercitando una azione a getto sul fronte di scavo , pulendo la faccia del foro e caricandosi di detriti che saranno trasportati , dal fluido stesso , in superficie .Tale fenomeno sarà possibile se il volume di fango in circolazione e la velocità di risalita nella zona anulare (annulus) del foro sono opportunamente dimensionati.

La velocità anulare dipende dalla sezione del foro, dalla pompa in uscita, dalle drillpipe e dalle drillcollar.

Comunemente si definisce:

$$V_a = \frac{\text{pumpoutput}}{\text{annularvol.}} \quad \left[\frac{\text{bbl} / \text{min} * 100}{\text{bbl} / 100 * \text{ft}} \right]$$

dove: V_a = velocità anulare [ft/min] .

Nel particolare tale formula non tiene conto del tipo di moto che si viene ad instaurare nella sezione anulare del foro , per cui è necessario distinguere i due casi di moto laminare e moto turbolento, Tschirley (1978)¹¹.

$$\text{laminar flow : } v_s = \frac{53.5(\gamma_s - \gamma_f)d_s^2 v_a}{6.65YP(d_b - d_p) + v_a PV}$$

$$\text{turbolent flow : } v_s = \frac{d_s(\gamma_s - \gamma_f)}{\gamma_f}$$

dove : γ_s = peso specifico del cutting [lb/gal]

γ_f = peso specifico del fluido di perforazione [lb/gal]

v_a = velocità anulare del fluido [ft/sec]

d_s = diametro del cutting [inches]

YP = yield point [lb/100sq ft]

d_b = diametro del foro o dimensione del bit [inches]

d_p = drillpipe O.D. [inches]

PV = viscosità plastica [cP]

L'efficacia della rimozione dei detriti è diretta funzione della capacità di trasporto del fluido utilizzato , che dipende da alcuni fattori, quali:

densità del fluido di perforazione ; incrementando la densità del fluido viene incrementata la forza di galleggiamento che agisce, su ognuna delle particelle, nella direzione opposta alla forza gravitazionale, Williams e Bruce (1951)⁽²⁾ (Fig.112).

¹¹ Tschirley,N.K.,1978. Manual of Drilling Fluid Technology. Baroid Petroleum Services Co., Houston Texas,200pp.

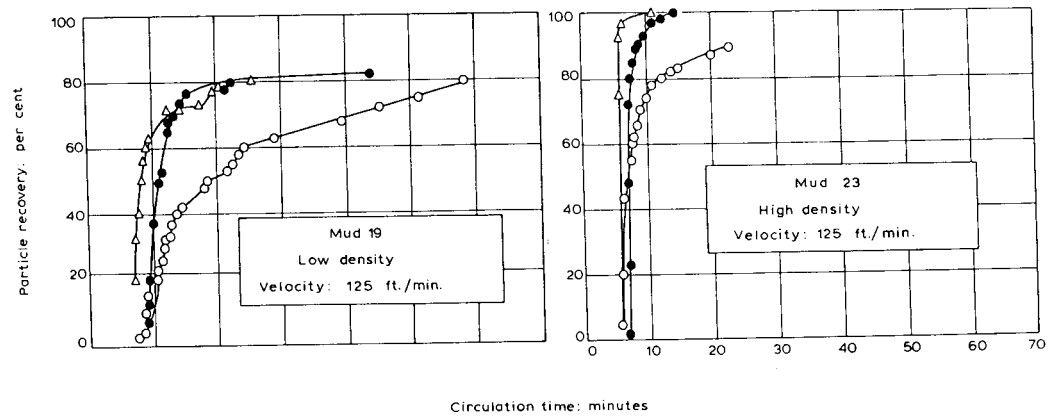


Figura 112 - Effetti della densità di un fango sul recupero dei cuttings , relazione tra il recupero dei cuttings (%) e il tempo di circolazione (min)

Come si può vedere dai grafici , un fango più pesante permette un recupero maggiore di detriti a parità di condizione di flusso e delle altre proprietà.

viscosità della fase liquida e forza di gel ; al contrario della densità , un incremento del recupero di detriti si ha con basse viscosità e forze di gel , come è illustrato sui grafici che seguono, Williams e Bruce (1951)¹² (Fig.113).

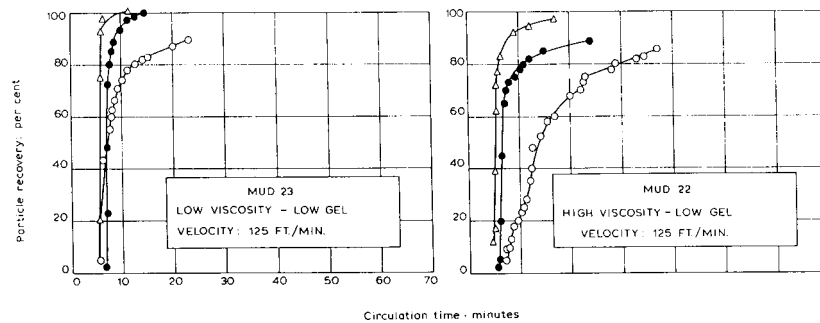


Figura 113 - Effetti della viscosità di un fango sul recupero dei cuttings . Relazione tra il recupero dei cuttings (%) e il tempo di circolazione (min)

tipo di flusso (laminare o turbolento); distribuzione della velocità ; un incremento della capacità di trasporto può essere raggiunto con un flusso turbolento anziché con un flusso laminare per un fluido di perforazione con bassa viscosità e forza di gel paragonabile all'acqua nel caso di non rotazione delle aste, "drillpipe". In particolare la presenza di un flusso turbolento tende a minimizzare la possibilità dei cuttings di scivolare o

¹² Williams, C.E., Jr. and Bruce, G.M., 1951. Carrying capacity of drilling fluids. Trans. Soc. Pet. Eng. AIME , 192 (3026):111-120.

lungo le stesse aste o in corrispondenza delle pareti del foro. Il profilo di velocità di un flusso laminare assume l'andamento di una parabola, variando da zero vicino le pareti a un massimo al centro dell'intercapedine aste-pareti del foro , "annulus". In questo modo il cutting potrebbe avere una velocità , vicino le pareti, maggiore di quella lungo le aste con il risultato di uno scivolamento verso il basso sulle pareti (Fig.114).

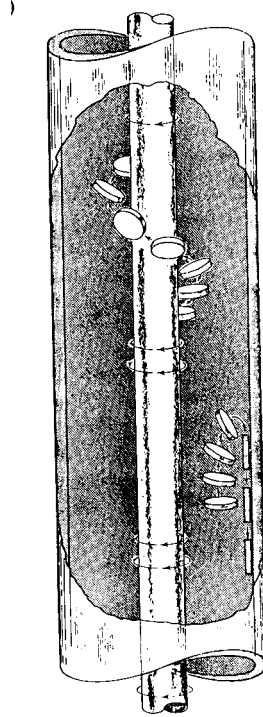


Figura 114 - Trasporto di un disco di dimensioni medie in un flusso laminare all'interno di una asta di perforazione in rotazione

La rotazione delle drillpipe induce , in presenza di un flusso laminare, un effetto di torsione che ulteriormente ostacola la rimozione dei cuttings e quindi il loro trasporto in superficie da parte del fango . Un effetto torsionale risulta dalla tendenza delle particelle a ribaltare quando soggette a forze differenti come risultato della variazione della velocità del fluido nel caso di flusso laminare, Williams and Bruce (1951)¹³ (Fig.115).

¹³ Williams, C.E., Jr. and Bruce, G.H., 1951. Carrying capacity of drilling fluids. Trans. Soc. Pet. Eng. AIME 192(3026):111-120

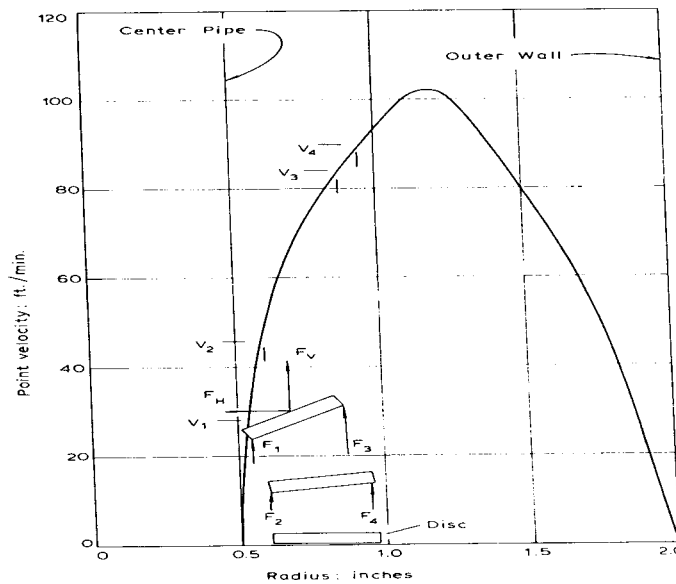


Figura 115 - Effetto della torsione su una particella in un flusso laminare

In un flusso turbolento la differenza di velocità è relativamente piccola attraverso l'annulus e quindi l'effetto di torsione risulta attenuato, Gatlin (1960)¹⁴.

Forma e dimensione dei cuttings: queste due caratteristiche dei cuttings sono funzioni del tipo di scalpello (bit) che si utilizza nella perforazione. In generale particelle con rapporto spessore-diametro inferiore a 0.3 sono difficilmente rimovibili in quanto tendono al ribaltamento più facilmente, Williams and Bruce (1951)³.

Rotazione del drillpipe: la rotazione delle drillpipe incrementa la capacità di trasporto di un fluido. Ciò risulta più pronunciato nel caso di flusso laminare che di flusso turbolento. Questo perché, in tali condizioni i cuttings tendono ad andare nella regione a più alta velocità a causa della forza centrifuga creata dalla rotazione delle aste stesse (Fig.116).

Rapporto tra il peso specifico della parte solida e il peso specifico del fluido.

Sempre riguardo la soddisfazione di questa funzione, un aspetto importante che il fluido deve verificare è la capacità di mantenere in sospensione i detriti e i materiali di appesantimento in caso di arresto della circolazione del fango e ritornare a fluire dopo la ripresa del moto. Tale proprietà va sotto il nome di "tixotropia", IMCO Services (1977)¹⁵.

¹⁴ Gatlin, C., 1960. Petroleum Engineering-Drilling and Well completions. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 341pp.

¹⁵ IMCO Services, 1977. Applied Mud Technology. 6th ed., 210pp.

Infine una volta che il fluido, carico di detriti, raggiunge la superficie è necessario che la parte solida, da esso contenuta, venga rimossa per permettere il riutilizzo del fluido così depurato. Diverse sono le tecniche per eseguire questa funzione, le più usate utilizzano i vibrovagli, per le granulometrie più o meno grossolane, le centrifughe, per le porzioni più fini. L'efficienza di queste operazioni condiziona le proprietà del fluido e le sue caratteristiche di flusso.

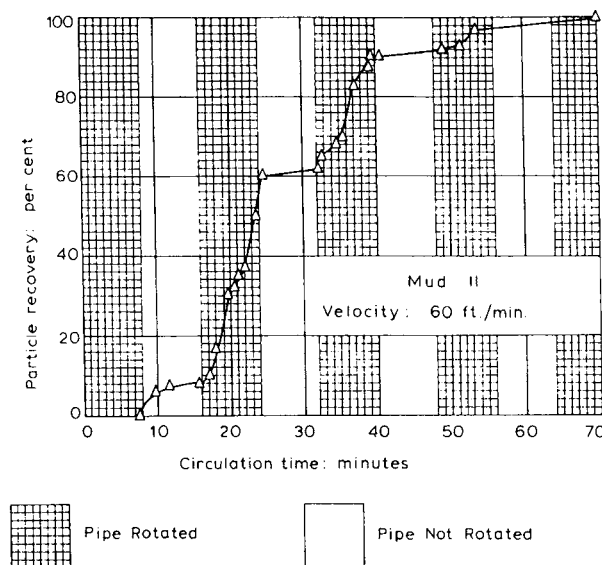


Figura 116 recupero di cuttings

8.1.2 Controllo delle pressioni di formazione

Il controllo della pressione di formazione consiste nell'esercitare una contropressione atta a bilanciare la pressione di strato evitando, così, l'ingresso in foro di eventuali fluidi da esso contenuti. In ogni punto del pozzo la pressione dipende dal peso specifico del fango (d) e dall'altezza della colonna idrostatica (h) nel punto considerato, secondo la seguente espressione:

$$p = \frac{(h * d)}{10}$$

In base a ciò, per ragioni di sicurezza, si preferisce perforare con un fango che abbia un peso specifico tale che la pressione idrostatica, esercitata in ogni punto, sia superiore a quella delle formazioni attraversate, Fertl e Chilingarian (1977)¹⁶.

¹⁶ Fertl, W.H. and Chilingarian, G.V., 1977. Importance of abnormal formation pressure. J.Pet. Technol., 29(4):347-355.

Il mantenimento, dell'opportuna, pressione idrostatica può essere realizzato con l'aggiunta di barite o ematite nelle quantità precisamente stabilite (Fig.117).

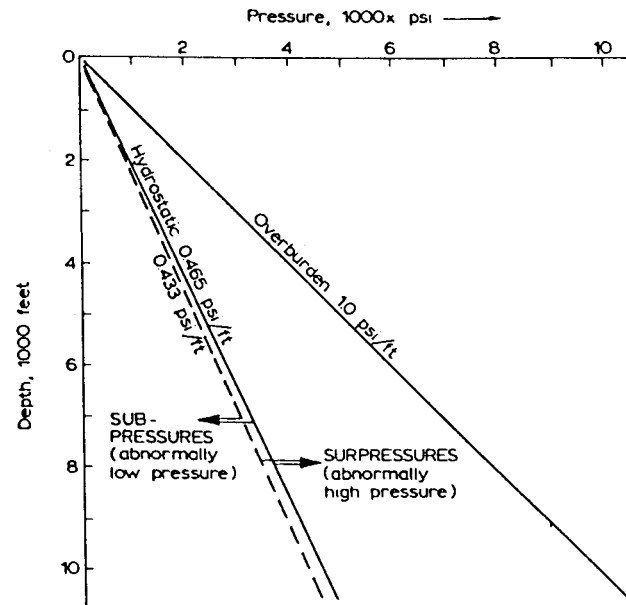


Figura 117 - Concetto della pressione nel sottosuolo

8.1.3 Stabilizzazione del foro

La stabilizzazione del foro mediante la formazione di un "Filter cake", un pannello impermeabile di spessore dell'ordine dei mm che consolida la parete del foro impedendo che rocce non cementate entrino nel fango con conseguenti franamenti e scavernamenti, isolando idraulicamente il foro stesso dagli strati permeabili attraversati e riducendo la trasmissione della pressione all'interno della formazione.

8.1.4 Supportare il peso del casing e della batteria di perforazione

Supportare il peso del casing e della batteria di perforazione secondo un fenomeno di galleggiamento istituito imponendo una forza uguale al peso del fango circolato. L'incremento della forza di galleggiamento può essere ottenuto incrementando la densità del fango e riducendo lo sforzo (tensione) sulla "drillpipe" e sul casing in profondità, IMCO Services (1977)¹⁷ (Fig.118).

¹⁷ IMCO Services, 1977. Applied Mud Technology. 6th ed. ,210pp,p.4.

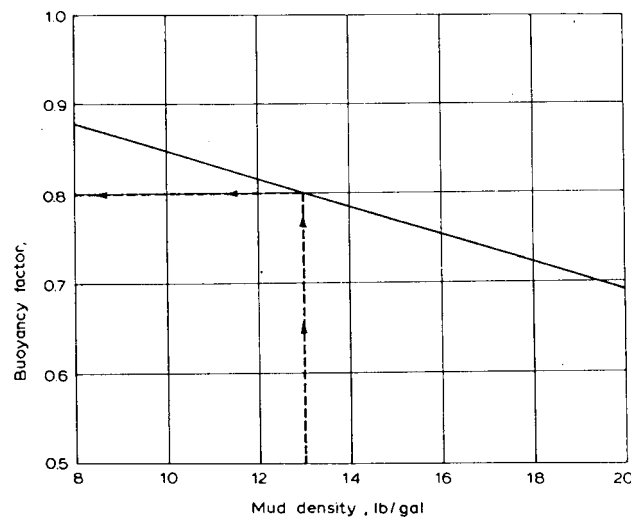


Figura 118 - Diagramma del fattore di galleggiamento in funzione della densità del fango

8.1.5 Pulizia , raffreddamento e lubrificazione della batteria di perforazione

Pulire , raffreddare e lubrificare la batteria di perforazione. L'azione di incisione della roccia e di macinazione dei detriti da parte dello scalpello, "bit", lo farebbe riscaldare eccessivamente. Il flusso di fango mantiene la sua temperatura su valori accettabili. Inoltre l'ambiente acquoso in cui si lavora fornisce una certa lubrificazione nei punti di contatto acciaio-roccia per cui si ha una maggiore durata della vita dello scalpello con conseguente riduzione del numero degli stessi occorrenti per uno stesso tratto e riduzione del numero di manovre , il tutto si traduce in un notevole risparmio economico. La proprietà di lubricità di un fluido di perforazione , in particolare , dipende dalla composizione dello stesso e dalla presenza di opportuni additivi . Da ciò deriva che diversi fluidi hanno differenti gradi di lubricità. Questo è messo in evidenza anche dai differenti gradi di lubricità dei fluidi che vanno a costituire la base dei fanghi di perforazione, Tschirley (1979)¹⁸, Baroid (1977)¹⁹:

aria 0.5

acqua 0.35

diesel oil 0.07

Nelle tavole seguenti sono illustrati: l'effetto dell'olio sulla lubricità e la lubricità di fanghi base olio e fanghi base acqua.

¹⁸ Tschirley, N.R., 1979. Manual of Drilling Fluids Technology. Baroid Petroleum Services, Vol. 2°, Table 5°.

¹⁹ Courtesy of Baroid Petroleum Services, 1977a. Vol. 2°, Section 1°, P. 21, Table 9°.

Hydrocarbon	Concentration (bbl/bbl)	Oil spotted directly without mixing into mud	Oil incorporated into mud with high-shear mixing
None	0	0.13	0.23
Diesel oil	0.1	0.07	0.23
Crude oil	0.1	0.07	0.23
Fuel oil No. 6	0.1	0.07	0.23
Asphalt-kerosine	0.1	0.07	0.23
Kerosine	0.1	0.13	0.23

Mud type	Lubricity coefficient
Unweighted water-base drilling fluid (fresh water was organically thinned)	0.24
Unweighted oil mud	0.09
High-weight, water-base drilling fluid (fresh water was organically thinned)	0.22
High-weight oil mud	0.08

8.1.6 Trasmissione della potenza idraulica allo scalpello

Il fluido di perforazione è il mezzo (strumento) che trasmette la potenza necessaria allo scalpello, "bit", per disgregare e pulire il fronte di scavo del pozzo. L'esperienza ha mostrato che una buona pulizia, disgregazione del foro, incrementa l'avanzamento. Il programma idraulico di un fango prevede il calcolo della velocità e della pressione con cui il fango stesso deve essere fatto circolare all'interno del foro, il tutto tenendo conto della densità e della viscosità del fluido. La potenza idraulica allo scalpello può essere incrementata diminuendo le aperture degli ugelli, da cui fuoriesce il getto di fluido, e/o incrementando la velocità di flusso, Allen (1977)²⁰ (Fig.119).

²⁰ Allen, J.H., 1977. Contemporary Methods for Determining the Parameters that Affect the Rate of Penetration. 3rd Adriatic Symp. on Oil Well Drilling, Porec, Yugoslavia. May 23-27, 20pp.

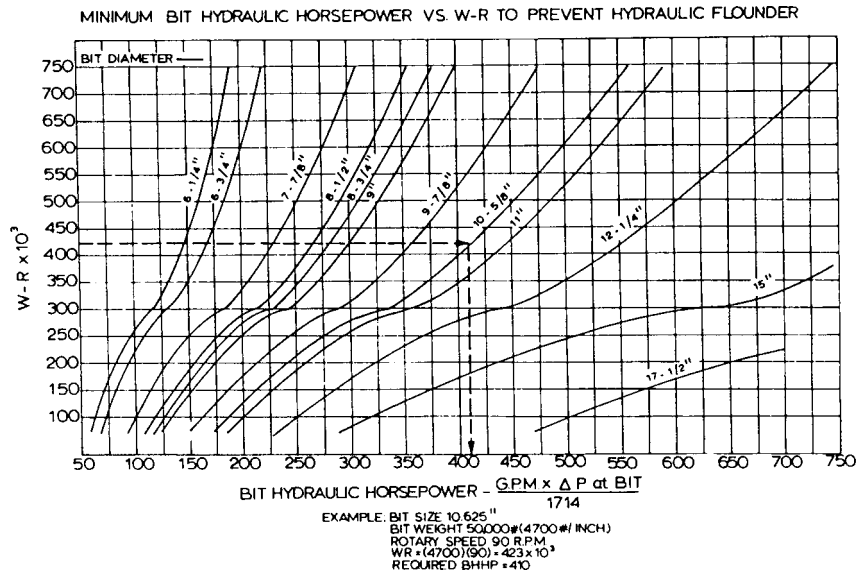


Figura 119 - Relazione tra la potenza idraulica trasmessa allo scalpello e WR

8.1.7 Limitare la corrosione delle parti tubolari metalliche

Spesso i fluidi di perforazione possono dar luogo a fenomeni di corrosione elettrochimica trovandosi a contatto delle parti tubolari metalliche. L'idrogeno solforato (H_2S) e l'anidride carbonica (CO_2) sono comunemente presenti nelle perforazioni profonde. L' (H_2S) reagisce con il ferro delle parti superficiali dei tubi formando ferro solforato (FeS) liberando due atomi di idrogeno che raggiungono l'acciaio innescando la corrosione. Lo stesso succede con la (CO_2) che in presenza di acqua forma l'acido carbonico (H_2CO_3) innescando una reazione simile alla precedente.

I fanghi a base di olio, riguardo questo fenomeno, svolgono una azione protettiva nei confronti delle parti metalliche riducendo la possibilità di corrosione. Un metodo di controllo della corrosione è attraverso la protezione catodica con cui si polarizza la struttura metallica da proteggere applicando una corrente esterna. L'effetto di tale corrente è quello di eliminare la differenza di potenziale tra anodo e catodo nella zona attaccata dal fenomeno della corrosione²¹.

8.1.8 Fornire informazioni sul terreno attraversato

Mediante un accurato esame dei detriti che il fango trasporta da fondo pozzo in superficie e dalle variazioni di ioni nel filtrato nel fango (cloruri,

²¹ National Association of Corrosion Engineers, 1979. Corrosion Control Petroleum Production. NACE TPC Publ. No 5, 101pp.

solfati, etc....) si riesce a risalire alla natura della formazione attraversata

8.1.9 Salvaguardia dell'ambiente e della formazione produttiva

Per quanto riguarda l'ambiente, ci sono una serie di restrizioni legislative che vincolano all'uso di prodotti che hanno caratteristiche tossiche e delle guide atte a stabilire il massimo livello ammissibile nei fluidi di perforazione associate alla quantità di detriti scaricati.

Infine per il non danneggiamento della formazione produttiva, il fluido è in grado di formare un "filter cake" di cui si è parlato nel paragrafo precedente.

8.2 Classificazione dei fluidi di perforazione

I fluidi di perforazione, "fanghi", sono una sospensione colloidale costituita da una fase liquida e una fase solida e vari componenti chimici.

In base alla fase liquida essi si suddividono in:

fanghi a base d'acqua , dove l'acqua può essere industriale, brine, salmastra, acqua di mare ;

fanghi a base di olio , dove l'olio può essere crudo , diesel , minerale , fluidi sintetici ;

fanghi emulsionati, cioè costituiti da un emulsione di olio in acqua o di acqua in olio;

fanghi areati ,costituiti da un miscuglio liquido-aria.

La fase solida comprende:

sostanze colloidali che possono essere aggiunte volontariamente al fango o provenire dai terreni attraversati;

sostanze minerali quali argille in genere, bentonite, sabbie, sostanze organiche;

sostanze inerti come materiali di appesantimento (barite, galena, etc....), sabbie, silt, additivi.

Per quanto riguarda i componenti chimici, questi possono essere:

viscosizzanti per garantire maggiore capacità di sospensione, tra i quali argille inorganiche, polimeri;

controllori del filtrato tra i quali amidi, cellulose, lignite, sintetici;

inibitori delle argille come complessi di alluminio, glicoli, bitumi;

deflocculanti, copolimeri, fosfati, poliacrilati;

controllori dell'alcalinità (pH) come la soda caustica ($NaOH$), il bicarbonato di sodio ($NaHCO_3$), la soda Ash (Na_2CO_3), Hutchinson e Anderson (1974)²².

8.3 Proprietà dei fluidi di perforazione

8.3.1 Peso specifico o densità

È quella caratteristica che contribuisce al trasporto dei detriti in superficie e che consente di mantenere nel foro un carico idraulico tale da contrastare la pressione dei fluidi contenuti nelle formazioni attraversate. La densità del fango dipende dalla quantità e dal peso specifico delle sostanze che costituiscono la fase solida. L'aumento di densità può essere ottenuto sia con l'aggiunta di sostanze colloidali che comportano anche un aumento di viscosità, sia con l'aggiunta di minerali pesanti (barite, galena, etc..) che non comportano un eccessivo aumento di viscosità. L'incremento di densità se da un lato permette di controllare le pressioni dei fluidi di formazione, dall'altro può dar luogo a squilibri idraulici fra interno ed esterno del foro con conseguenti infiltrazioni di liquido entro le formazioni permeabili, (perdite di circolazioni) con possibilità di franamenti ed eruzioni.

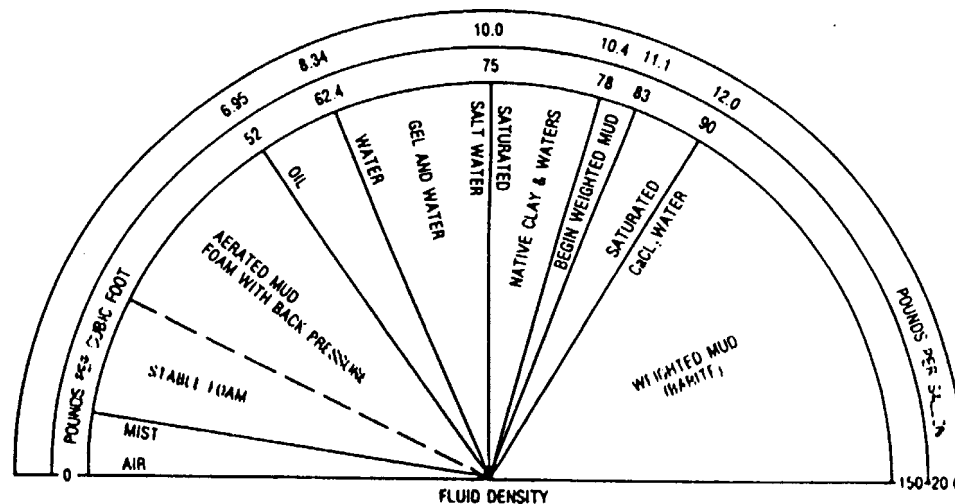


Figura 110 - Variazione del tipo di fluido di perforazione in funzione del loro peso specifico

²² Hutchinson, S.O. and Anderson, G.W., 1974. What to consider when selecting drilling fluids World Oil.

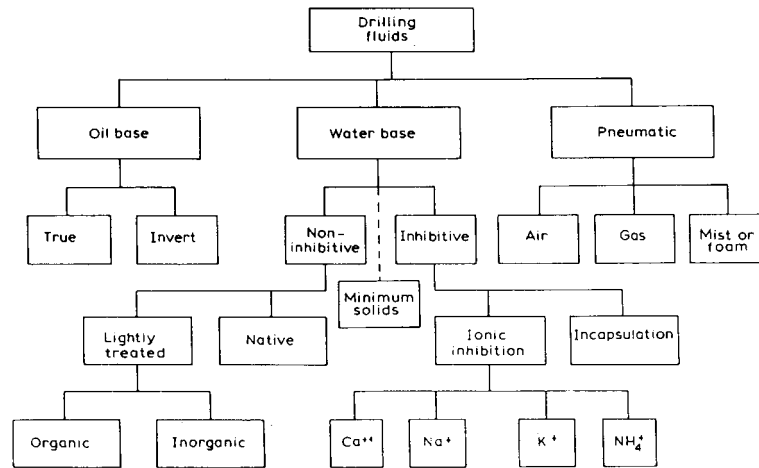


Fig. 110 - Classificazione dei fluidi di perforazione

Figura 111 - Classificazione dei fluidi di perforazione

8.3.2 Filtrato

Con questo termine si indica la quantità di parte liquida del fango che si infila nelle formazioni. In generale si preferisce avere una bassa filtrazione in quanto l'acqua che si infila può provocare una riduzione della produttività dovuta al rigonfiamento delle particelle di argilla eventualmente presenti con conseguente riduzione della permeabilità, o si emulsiona bloccando il flusso del fluido mineralizzazione. Diversi sono i fattori che influenzano il filtrato²³ (Fig.112):

temperatura;

pressione idrostatica;

pannello "mud cake".

Il flusso di filtrazione è regolato dalla legge di Darcy:

$$\frac{dV_w}{dt} = \frac{K^2 \Delta p}{\mu_f V_s} = \frac{K^2 \Delta p r}{\mu_f V_w}$$

integrando :

$$V_w = \frac{K \Delta p^{1/2} r^{1/2} t^{1/2}}{\mu_f^{1/2}}$$

²³ Manual of Drilling Fluid Technology , Vol.2°,Sec.1°,p.16. Baroid Petroleum Services.

dove: V_w = volume della fase continua

t = tempo

K = costante caratteristica del fluido di perforazione

V_s = volume dei solidi

Δp = differenziale di pressione attraverso la zona permeabile

r = rapporto tra V_w e V_s

μ_f = viscosità del filtrato o della fase continua

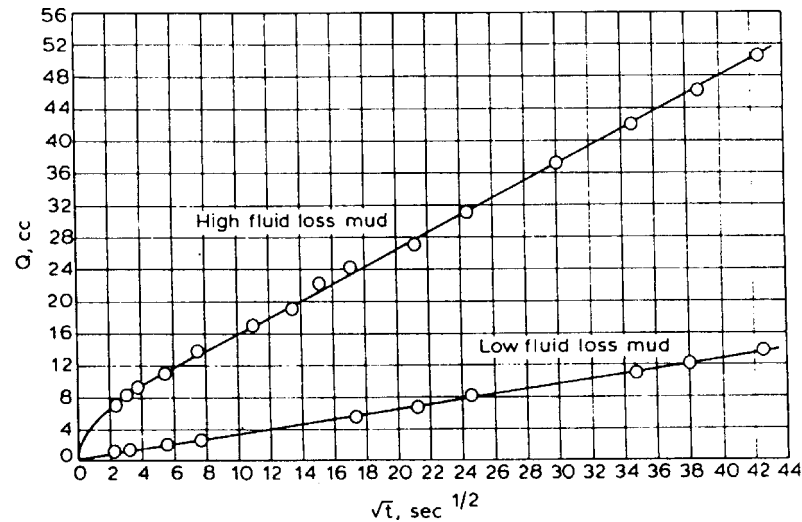


Figura 3512 - Relazione tra volume di filtrato (cmq) e il tempo (sec)

8.3.3 Viscosità

È la resistenza offerta da un fluido al flusso ; questo fenomeno è attribuibile alle forze di attrazione tra le molecole del fluido ed è la misura degli effetti combinati di adesione e coesione delle particelle sospese nel liquido con l'atmosfera del liquido stesso , che le circonda . Più grande è questa resistenza, più è grande la viscosità, Blinder (1962)²⁴ (Fig.113).

La viscosità risulta essere uguale al rapporto tra lo "shearing stress" e il "rate of shearing strain":

²⁴ Blinder, R.C., 1962. Fluids Mechanics, 4th ed. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs N.J., 453pp.

$$\mu = \frac{\text{shearing stress}}{\text{rate of shearing strain}} = \frac{(F / A)}{(V / h)} = \frac{\tau}{(V / h)}$$

dove : μ = coefficiente di viscosità

F = forza necessaria per lo scorrimento

A = area di contatto

V = velocità del piano superiore

h = distanza tra i due piani

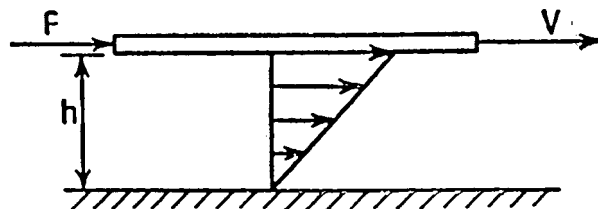


Figura 113 - Flusso tra superfici parallele

8.3.4 Viscosità plastica

La viscosità plastica è definita come la misura della resistenza interna che si oppone allo scorrimento di un fluido, ed è dovuta alla quantità di solidi presenti, al loro tipo e alle loro dimensioni. La viscosità è una proprietà molto importante del fluido di perforazione perché influenza la sua capacità di trasporto dei prodotti della perforazione in superficie.

La viscosità di ogni fluido è funzione di quattro fattori:

viscosità della fase liquida;

concentrazione, forma e distribuzione granulometrica delle particelle solide per unità di volume;

forza interparticellare;

grado di emulsione dell'olio in acqua o dell'acqua in olio e stabilità dell'emulsione.

L'inverso della viscosità plastica definisce l'avanzamento.

La viscosità è così calcolata:

$$F = A\mu \frac{d_v}{d_r}$$

dove:

F = forza necessaria per lo scorrimento;

μ = costante di proporzionalità chiamata coefficiente di viscosità o semplicemente viscosità;

A = area di contatto ;

$dv/d r$ = velocità di scorrimento o shear rate

Dalla precedente formula si ottiene:

$$\mu = \frac{(F / A)}{(d_v / d_r)} = \frac{\text{sfuerzo di scorrimento}}{\text{velocità di scorrimento}} = \frac{\text{Shear stress}}{\text{Shear rate}}$$

L'unità di misura della viscosità è il Poise, si dice che un fluido ha la viscosità di un Poise quando è necessario esercitare una forza di una Dine per spostare di un centimetro in un secondo due strati contigui con una superficie di un centimetro quadrato e distanti tra loro un centimetro, Olson (1973)²⁵.

8.3.5 Viscosità apparente

E' la viscosità di un fluido , misurata con un determinato strumento , ad una determinata velocità stabilita. E' funzione della viscosità plastica e dello yield point e si misura in centipoise, API (1969)²⁶ (Fig.114).

Figura 114 –

8.3.6 Tixometria

E' la capacità di una sospensione colloidale di passare dallo stato fluido vero e proprio allo stato di “gel” quando si passa dallo stato di moto allo

²⁵ Olson,R.M.,1973. Essentials of Engineering Fluid Mechanics,3rd ed. Intext Educational Publ.,New York, N.Y.,636pp.

²⁶ American Petroleum Institute,1969.Standard Field Procedure for Testing Drilling Fluids.API Div..Proc.,Dallas,Texas,RP.13B.

stato di quiete, tale comportamento è, logicamente, reversibile per agitazione meccanica

E' una proprietà indispensabile per ogni tipo di fluido di perforazione perchè rende il fango adatto a mantenere in sospensione i detriti mentre le operazioni di perforazioni sono temporaneamente sospese. La tixotropia può essere alterata variando il contenuto di solidi o mediante additivi chimici.

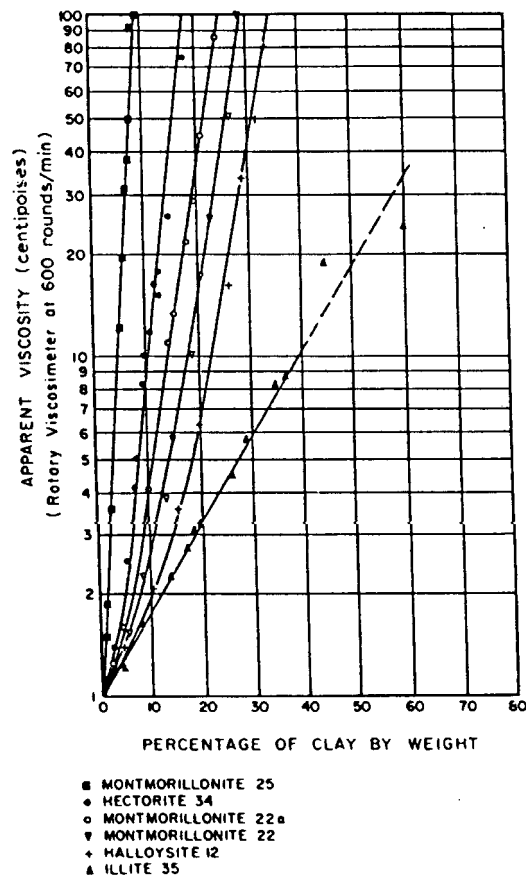


Figura 115 - Relazione tra la viscosità apparente e la percentuale in argilla nel fango

8.3.7 Alcalinità

E' la capacità di una base misurata per mezzo del numero massimo di equivalenti di un acido con il quale può reagire a formare un sale. Consiste nel determinare il contenuto di ioni ($OHCO_3$) e (HCO_3) nel fango.

8.3.8 Forza di Gel

Il "gel" è la misura delle caratteristiche tixotropiche di un fluido, quantitativamente è la forza necessaria a rompere una struttura gelificata. Le misure della forza di gel si eseguono dopo 10 secondi e dopo 10 minuti

di riposo del fluido . L'unità di misura normalmente utilizzata è espressa in g/100cmq .

E' la misura delle stesse forze che agiscono tra le particelle di una sospensione come per lo Yield Point. La differenza è che la forza di gel è misurata in condizioni statiche mentre lo Yield Point in condizioni dinamiche, Garrison (1940)²⁷.

8.3.9 Valore di Yield o “Yield Point”

Lo Yield Point è la resistenza al flusso iniziale di un fluido, cioè lo sforzo richiesto per fare iniziare il flusso di un fluido. Questa resistenza è dovuta alle cariche elettriche che sono vicino o sulla superficie delle particelle di una sospensione. I valori di YP e tixotropia sono misure della stessa proprietà del fluido solo che in condizioni diverse, Darley (1976)²⁸.

²⁷ Garrison,A.D.,Ten Brink,K.C.,1940. A study of some phase of chemical control in clay suspensions.Trans.AIME,136:175-194.

²⁸ Darley,H.C.H.,1976. Advantages of Polymer Muds.Pet.Eng.Int.,48 (sept.11).