

Aste di perforazione per directional drilling.

Renzo Chirulli

Massimo Colli, (Colli Drill S.r.l.)

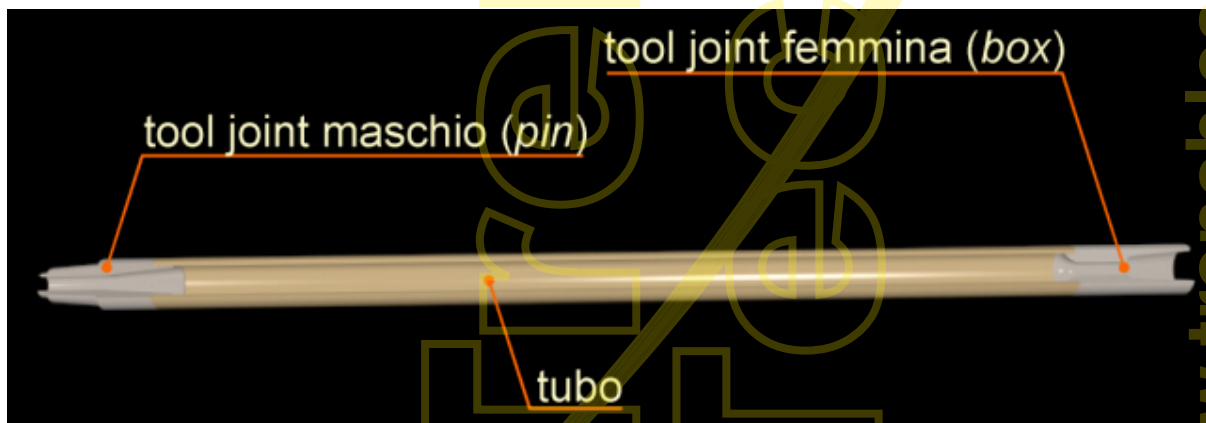
Tra i componenti che costituiscono un impianto per directional drilling, le aste di perforazione rappresentano un elemento di estrema importanza perché in funzione delle prestazioni che possono fornire, consentono o meno l'esecuzione di un lavoro.

Se il directional drilling esiste e va esprimendo potenzialità sempre maggiori, questo è anche grazie all'esistenza di aste di perforazione ideate e costruite per questo specifico impiego.

1. Che cos'è un'asta di perforazione ?

L'asta di perforazione (in inglese *drill pipe* o *drill rod* o semplicemente *rod*) è un organo atto alla trasmissione di forze e fluidi dalla perforatrice (*unità di superficie*) all'utensile fondo foro.

E costituita normalmente da un tubo (*pipe*) e da due terminazioni filettate (*manicotti* o *tool joint*) che servono per permettere la connessione di più aste tra di loro, per la formazione della così detta batteria di perforazione (*drill string*).



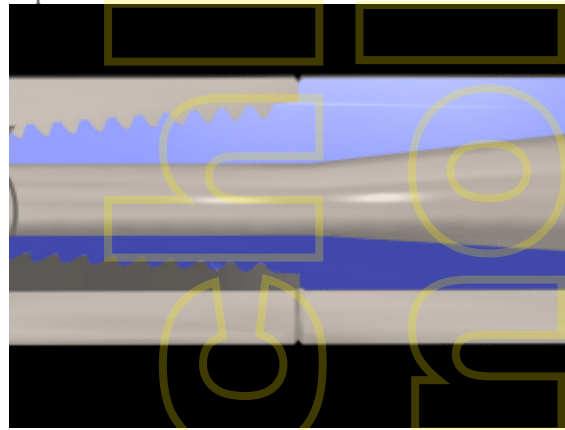
I tool joints possono essere ottenuti per lavorazione meccanica delle estremità del tubo, opportunamente ringrossate, come avviene per le aste così dette "forged one piece" (forgiate da singolo pezzo), oppure essere assemblate ad un tubo a sezione costante, secondo vari processi (aste saldate ad attrito, aste

saldate a filo, ecc.). Questa caratteristica delle aste, apparentemente legata solo a problemi di tecnologia produttiva, è invece determinante per quanto riguarda le caratteristiche di resistenza di tutta l'asta, influenzandone in modo essenziale il comportamento in esercizio.

2. Condizioni d'uso delle aste di perforazione.

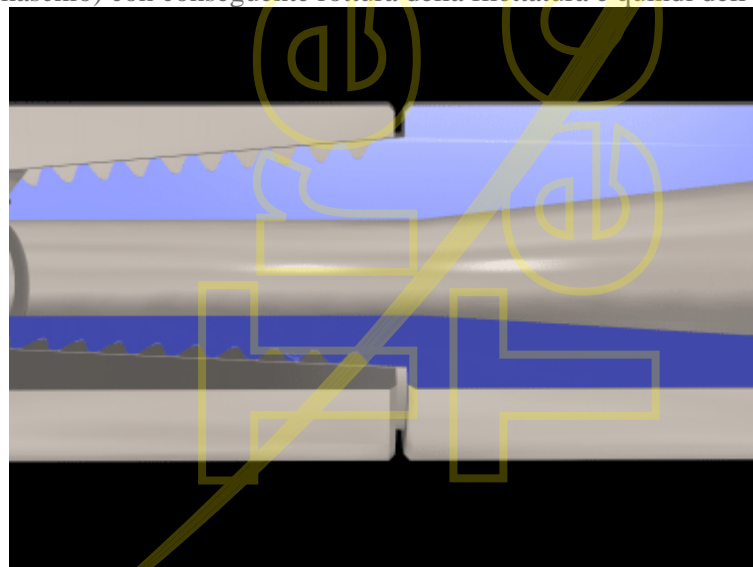
All'inizio delle operazioni di perforazione alla rotary viene avvitata una prima asta, ed all'estremità libera di quest'ultima tutto il complesso dei dispositivi fondo foro (utensile, sonda, ecc.). Si avvia la perforazione e la testa della perforatrice, traslando lungo il mast, si porta tutta in avanzamento; si svita quindi la rotary dalla prima asta (che si trova a questo punto per buona parte nel sottosuolo), si porta la rotary in posizione tutta arretrata e quindi si avvita una seconda asta (un estremo alla rotary e l'altro all'asta che fuoriesce dal terreno). Procedendo in tal modo le aste possono andare a comporre batterie lunghe anche diverse centinaia di metri (tanti quanti sono i metri della perforazione). Al ritorno (fase di alesatura o tiro) si procede esattamente al contrario.

È essenziale in queste operazioni che le connessioni filettate vengano ben serrate al fine di ottenere un perfetto accoppiamento tra le spalle di contatto dei manicotti.



La figura mostra uno spaccato di un accoppiamento ben serrato. Le spalle sono in pieno contatto.

Se questa condizione non viene rispettata durante le operazioni di perforazione, nelle quali la batteria risulta fortemente sollecitata anche flessionalmente, non essendoci alcun contatto di spalla, lavoreranno sezioni resistenti notevolmente meno resistenti di quelle massime (in genere corrispondenti alle sezioni delle filettature del maschio) con conseguente rottura della filettatura e quindi dell'asta.



Un accoppiamento non serrato o addirittura aperto causa quasi sempre la rottura del maschio.



Durante le normali operazioni di perforazione direzionale le aste vengono assoggettate ad un complesso di sollecitazioni derivanti:

- dalle forze generate dalla perforatrice (torsione, trazione o spinta)
- dalle interazioni con il terreno
- dalle forze sviluppate da eventuali utensili fondo foro a moto autonomo (martelli pneumatici o idraulici fondo foro, mud motors)
- dalle forze sviluppate da eventuali martelli idraulici posti sulla rotary (sistema ormai in disuso)

2.1. Forze generate dalla perforatrice.

La perforatrice comunica alla batteria di aste essenzialmente due tipi di sollecitazione:

- un momento torcente M_p , generato dalla rotary idraulica
- una trazione o una compressione S generate dagli organi di tiro o spinta della unità di perforazione (pistoni idraulici di tiro/spinta o motoriduttori idraulici)

L'entità di queste forze caratterizza la capacità della perforatrice (tiro e coppia).

Il rapporto tra queste due sollecitazioni varia da costruttore a costruttore. E ciò si ripercuote sulla tecnica di perforazione.

A titolo esemplificativo le coppie possono variare da 500 a 30.000 Nm (ed anche oltre su impianti di grandissima dimensione) ed i tiri possono andare da 10 a 4.000 KN (ca. 1-400 t).

2.2. Forze generate dalle interazioni con il terreno

L'interazione con il terreno si traduce, nel directional drilling, essenzialmente nelle reazioni di vincolo che il terreno esercita sulla batteria di perforazione quando questa è costretta ad avanzare ed a ruotare sul proprio asse entro un perforo ad andamento non rettilineo. Quando l'asse del perforo presenta un andamento curvilineo, la batteria risulta inflessa in corrispondenza nei tronchi curvi del perforo. Questa inflessione, imposta dalla geometria del cavo, si traduce, per le aste che compongono quella sezione, in una sollecitazione flettente che va ad aggiungersi a quelle trasferite dalla perforatrice (coppia e tiro o spinta). Naturalmente ad una inflessione corrisponderà, date le caratteristiche del materiale, e la geometria della sezione resistente, un momento flettente M_f . Nota quindi la curvatura del cavo

(espressa ad esempio dalla misura del raggio di curvatura dell'asse della batteria di perforazione in una data sezione) è possibile calcolare **Mf**.

2.3. Forze sviluppate da eventuali utensili fondo foro a moto autonomo.

Gli utensili fondo foro a moto autonomo sono essenzialmente:

- martelli pneumatici o idraulici fondo foro
- mud motors con utensili da taglio o demolizione

I martelli hanno come moto autonomo quello di una massa battente (*piston*) che mosso da un opportuno fluido di alimentazione o potenza (aria, acqua) batte su una punta mobile che a sua volta impatta sul materiale da demolire in corrispondenza del fronte di perforazione. Per ogni colpo della massa battente, parte dell'energia sviluppata viene riflessa verso la batteria di aste. Perché oltretutto la punta possa esercitare delle forze sul fronte di perforazione è necessario che le aste sviluppino una reazione di vincolo in grado di permettere tale trasferimento. Senza entrare nel dettaglio di ciò che costituisce altra materia di approfondimento, ciò si traduce, per ogni colpo, in una forza aggiuntiva **I** di tipo impulsivo (compressione o anche trazione quando il martello batte a vuoto), che agisce lungo l'asse delle aste contribuendo in modo rilevante ad incrementare lo stato di sollecitazione delle stesse.

Questa forza può essere superiore, ed anche di molto, al tiro che una perforatrice da directional drilling è in grado di sviluppare e, se trascurata, può portare a degli errori di valutazione di rilevante entità.

I mud motors generano, grazie ad un opportuno fluido di potenza (in genere fanghi bentonitici) un moto rotatorio che viene comunicato ad un utensile (tricono o trilama) montato fondo al foro. Al contatto utensile terreno si generano una coppia resistente aggiuntiva **Ma** che deve essere equilibrata, perché vi sia un effettivo trasferimento di forze, dalla batteria di perforazione.

2.4. Forze sviluppate da eventuali martelli idraulici posti sulla rotary.

Si tratta di una tipologia di dispositivi ancora in uso ma sulla cui efficacia, nelle condizioni operative medie, molti esprimono dei fondati dubbi. L'azione percussiva viene infatti esercitata direttamente sulla testa esterna della batteria di perforazione, è attraverso questa, trasferita al fronte di perforazione. Naturalmente la batteria deve trasferire tutta l'energia sviluppata dal martello esterno, parte di questa energia si accumula nella batteria (sotto forma di energia elastica o sotto forma di calore) e parte arriva sul fronte di scavo, parte invece si scarica nel terreno per via delle forze di attrito presenti tra batteria di perforazione e terreno. All'aumentare della lunghezza del perforo, le forze di attrito crescono notevolmente, sino ad assorbire tutta la forza sviluppata dal martello esterno, col risultato di non avere più alcun avanzamento dell'utensile fondo foro, continuando nel contempo a sollecitare enormemente le aste e le connessioni filettate.

La forza trasferita alle aste è, come per i martelli fondo foro, assiale di tipo impulsivo, ma con valori decisamente più elevati di quelli trasferiti dai martelli battenti fondo foro.

Si tratta comunque di metodologie che stanno andando fortunatamente in disuso.

In totale le principali forze che possono sollecitare le aste di perforazione sono:

Momento torcente **Mt=Mp + Ma** (**Ma** va considerato se si utilizza un mud motor)

Momento flettente **Mf** (conseguente ad una curvatura di raggio **R** della batteria di perforazione)

Sforzo Normale **N = S+I** (**I** va considerato se si utilizza un martello fondo foro)

Se indichiamo con:

R = raggio di curvatura della batteria nella sezione più sollecitata

D = diametro esterno della sezione di minore resistenza dell'asta di perforazione

E = modulo di elasticità del materiale di cui sono composte le aste

A = sezione trasversale di minore resistenza dell'asta di perforazione

J_x = momento di inerzia della sezione di minore resistenza dell'asta di perforazione

σ_{id max} = tensione di lavoro massima ideale per il materiale (espressa in funzione di un criterio di resistenza ed in funzione di un opportuno coefficiente di sicurezza)

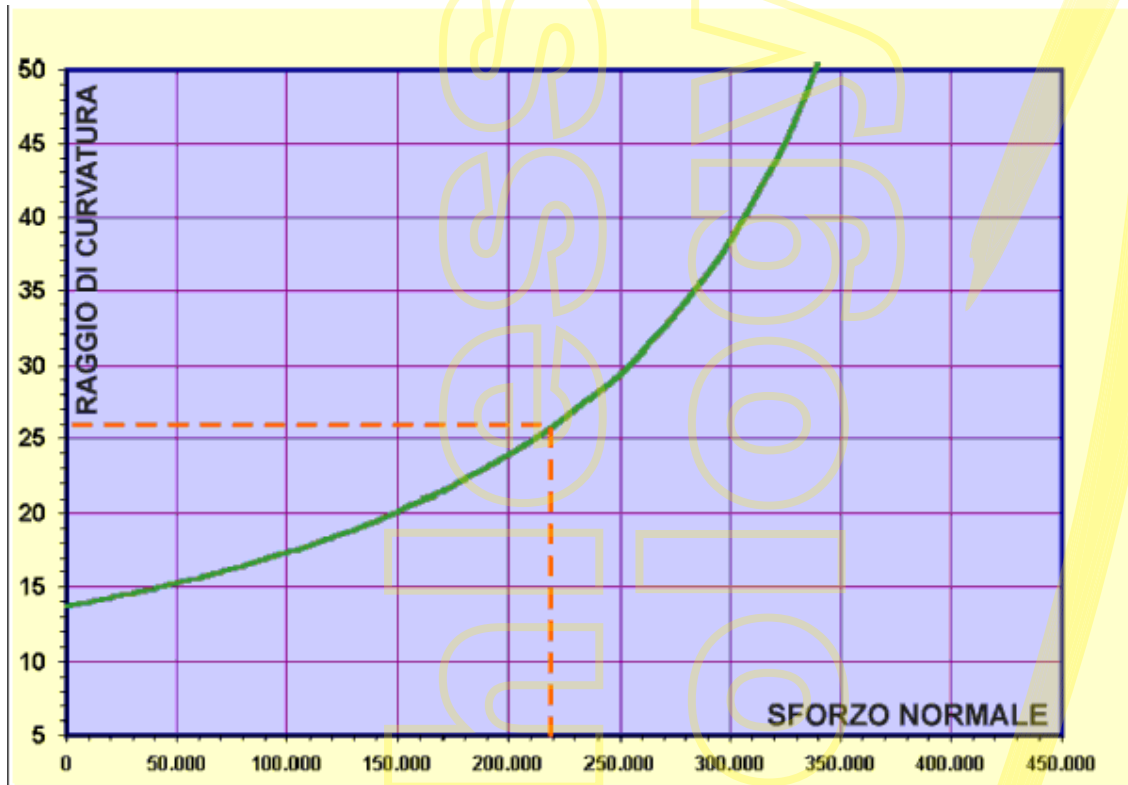


si ottiene che il minimo raggio di curvatura che le aste possono effettuare sotto l'azione del complesso di forze rappresentato da **Mt** ed **N** è dato da:

$$R = \frac{D \cdot E}{2 \left[\sqrt{\sigma_{id \max}^2 - 3 \left(\frac{Mt \cdot D}{4J_x} \right)^2} - \frac{N}{A} \right]}$$

A parità di caratteristiche geometriche e di resistenza dell'asta, la funzione appena espressa **R=f(N, Mt)** consente di disegnare, in un piano N,R, una famiglia di curve al variare di Mt, che chiameremo curve d'uso delle aste di perforazione.

In figura è mostrato il tipico aspetto di questo genere di diagrammi.

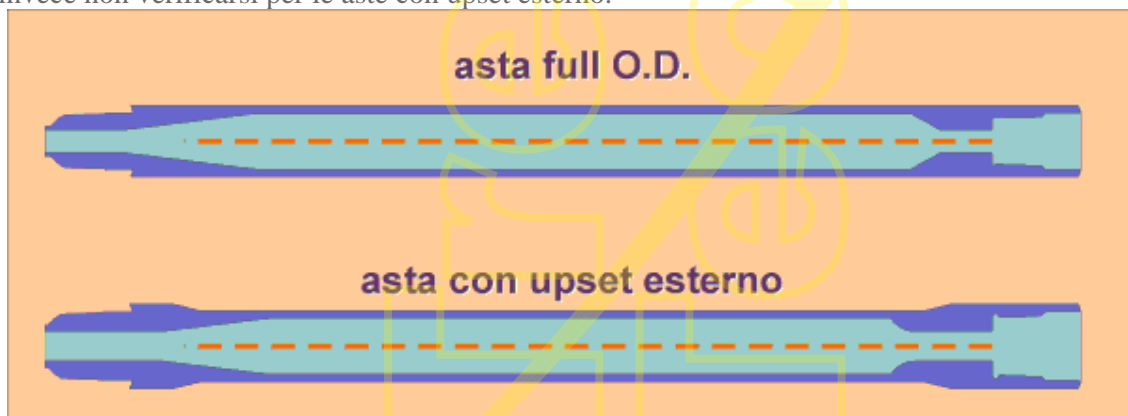


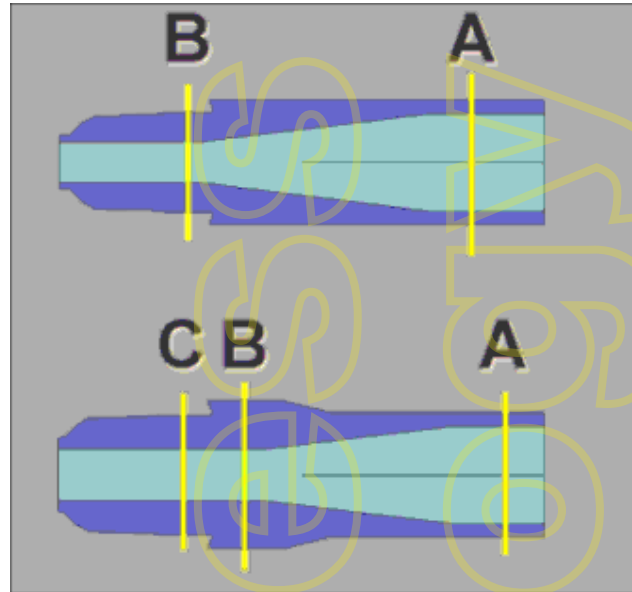
Una considerazione va esplicitamente fatta approposito della sezione di minima resistenza dell'asta a cui nelle formule si fa riferimento.

Si tratta di una grandezza che spesso viene confusa (con negative ripercussioni sull'esito del lavoro) con la sezione resistente del tubo per cui il diametro D viene identificato con il diametro esterno del tubo, mentre l'area A e quindi J_x con quella della sezione trasversale. È evidente che non è sempre così. Infatti in corrispondenza della connessione filettata, possono esservi sezioni resistenti dell'asta decisamente più piccole e meno resistenti di quelle del tubo, ed è con riferimento a queste sezioni che occorre impostare il calcolo.

Questa condizione è sempre verificata nelle aste così dette full OD cioè in quelle aste nelle quali il diametro esterno si mantiene costante.

Può invece non verificarsi per le aste con upset esterno.



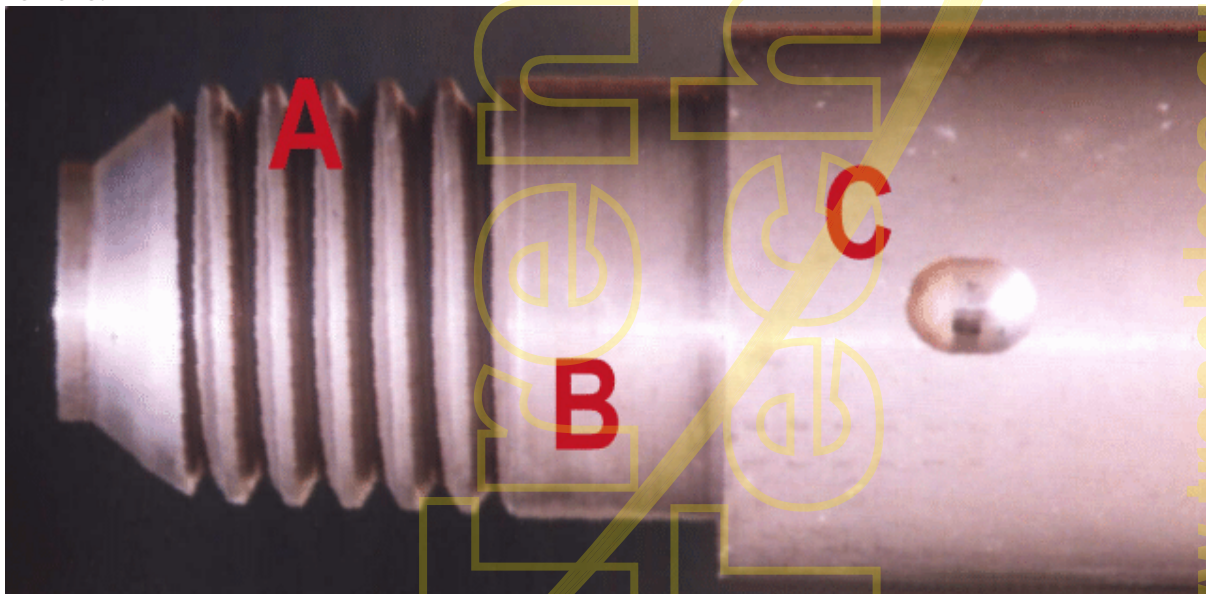


In un'asta Full OD (sopra) la sezione B è sempre meno resistente della sezione A. Viceversa nelle aste con upset esterno, se ben progettate le sezioni C e B sono di resistenza comparabile a quella della sezione A.

In generale un'asta con upset esterno ben disegnata può avere sezioni di resistenza comparabile lungo tutto il suo sviluppo, senza quindi mostrare, in caso di incidente, una particolare tendenza nel fenomeno di rottura.

Un'asta full OD tende invece sempre a rompersi (salvo i casi di aste saldate in maniera non opportuna) in corrispondenza delle connessioni filettate mostrando o la rottura del filetto maschio (pin) o l'apertura del filetto femmina (box).

Un disegno particolare delle filettature, come quello mostrato in figura, può limitare al minimo tale fenomeno.



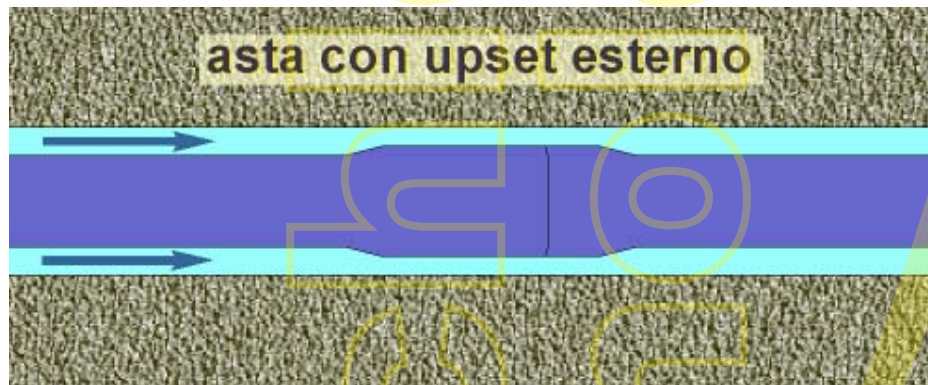
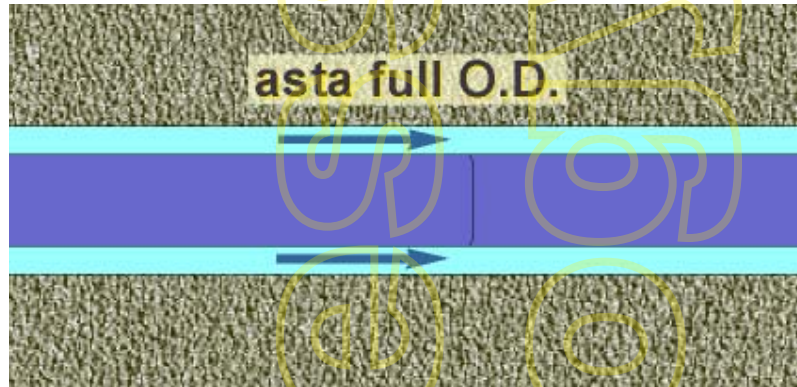
Manicotto filettato tipo RC (Colli Drill) - A, filetto conico; B, accoppiamento cilindrico; C, slot sferico per lo svitaggio.

Questo tipo di connessione risulta particolarmente efficace anche nei casi di accidentale e parziale disaccoppiamento delle spalle di battuta dei manicotti dovute a mancato serraggio o a rotazioni inverse della batteria di perforazione

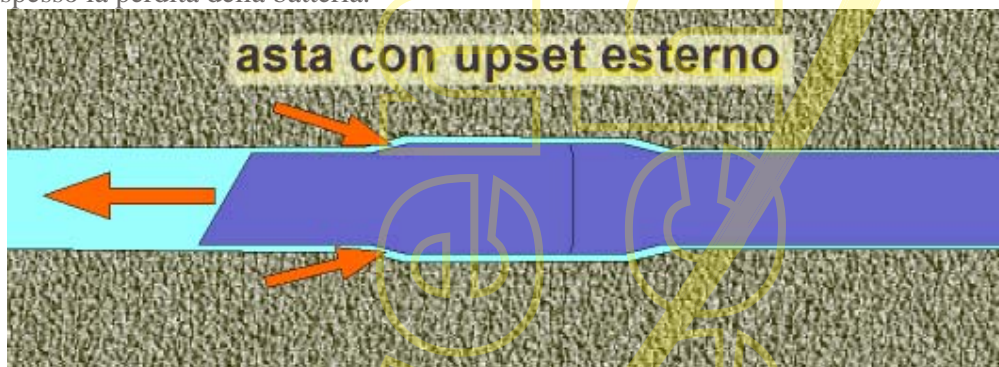
www.trenchless.eu

© All rights reserved by Renzo Chirulli

Sotto questo aspetto sembrerebbe quindi preferibile sempre un'asta con upset esterno. In realtà se è vero che un'asta con upset esterno può essere più resistente di una full OD, è anche vero che i ringrossi esterni, corrispondenti alle connessioni filettate, rendono l'intercapedine tra asta e pareti del perforo idraulicamente molto resistente limitando il deflusso del fluido di circolazione e quindi l'allontanamento del detrito.



Inoltre in presenza di terreni sciolti (sabbie) il terreno frana stringendo la batteria, e la presenza di tali risalti pone seri problemi poiché accresce enormemente la resistenza all'avanzamento ed al tiro, causando spesso la perdita della batteria.



Il compromesso perfetto purtroppo non esiste per cui andrà scelto il tipo di asta (full OD o con upset esterno) in funzione del tipo di lavoro che è necessario di volta in volta affrontare.

3. Materiali.

Il materiale di cui sono costituite le aste di perforazione deve rispondere a tre esigenze fondamentali e spesso contrastanti.

Deve infatti presentare:

- sufficiente resistenza alla trazione, alla compressione ed alle sollecitazioni taglienti
- sufficiente resistenza agli urti
- sufficiente resistenza all'abrasione

Quel sufficiente va ovviamente pesato con le condizioni di impiego, in quanto è evidente che non esiste né un materiale universale né un materiale che unisca contemporaneamente e nel massimo grado possibile queste tre caratteristiche.

Va inoltre notato che l'asta di perforazione pur essendo a tutti gli effetti un organo meccanico, viene fatta operare con tassi di lavoro del materiale comparabili con quelli che è usuale avere per materiali di consumo, per i quali si ammettono anche rotture o deformazioni permanenti.

A differenza di un materiale di consumo però l'asta non dovrebbe ammettere (se usata correttamente) rotture o deformazioni permanenti durante il normale esercizio.

Ciò impone il ricorso, nel calcolo strutturale delle aste, a coefficienti di sicurezza piuttosto elevati.

Non esiste in realtà una norma, per il directional drilling, che specifichi quanto alto debba essere questo coefficiente oppure quale debba essere il metodo di calcolo più opportuno, a differenza di quanto invece accade nel settore della perforazione petrolifera, nel quale sono espresse precise norme riguardanti la geometria, il criteri di calcolo le caratteristiche dei materiali e geometriche che devono caratterizzare le aste di perforazione destinate a quell'uso (*norme API - American Petroleum Institute*).

Un'altra considerazione essenziale che influenza in modo determinante la scelta dei materiali, è il costo finale del componente.

Ad esempio: la batteria di aste che costituisce la dotazione di base di una perforatrice di medie dimensioni (10 t) è lunga intorno ai 150 m (ovvero 50 aste da 3 m ciascuna), il costo della batteria oscilla mediamente dal 5% al 10% di quello dell'intera unità di perforazione. Poiché nell'uso potrebbero rendersi necessarie aste aggiuntive, o per il necessario periodico ricambio o per effettuare perforazioni e tiri più lunghi, si capisce bene come il costo unitario dell'asta di perforazione non possa oscillare oltre certi valori.

Per questo motivo ci si è orientati all'uso principalmente dell'acciaio. Ovviamente dire acciaio significa aver solo specificato una famiglia di materiali che conta qualche centinaio di migliaia di tipi tra loro anche diversissimi (interessante a tal proposito è una lettura, anche superficiale, dello *Stahlschlüssel - La chiave degli acciai* - il più autorevole catalogo internazionale di acciai).

Accanto agli acciai, ma evidentemente queste applicazioni vanno annoverate tra quelle speciali o sperimentali, si può ricorrere anche all'uso di:

- leghe di alluminio
- titanio
- materiali compositi a matrice metallica
- materiali compositi a matrice plastica

Si tratta peraltro di materiali che (tranne le leghe di alluminio) hanno un costo unitario elevatissimo e che richiedono speciali impianti per la fabbricazione delle aste, il cui costo è quindi notevolmente elevato.

Parallelamente non è possibile nemmeno parlare di diffusione di tali componenti speciali, di cui se ne da notizia solo per completezza espositiva.

Nella quasi totalità dei casi si ricorre all'uso di acciai basso legati con tenori di carbonio generalmente non superiori a 0.5-0.6 (% sul peso). Si tratta in genere di acciai compatibili con la bonifica (tempra e rinvenimento) che è quel trattamento che consente di raggiungere un buon compromesso tra resistenza alla trazione e resistenza agli urti (resilienza).

Tuttavia spesso le condizioni di esercizio sono tali da imporre (cautelativamente) coefficienti di sicurezza sul tasso di rottura del materiale (carico unitario di rottura) anche pari a 2. Non potendo eccedere con le dimensioni geometriche delle aste (diametro esterno) né con il loro peso (in stretta relazione con lo spessore di parete del tubo) si impone l'uso di acciai che presentano carichi unitari di rottura certamente superiori ai 700 MPa (ca. 6900 kg/cmq).

Siamo quindi nel campo degli acciai speciali (per composizione chimica) ad alta resistenza (per carico unitario di rottura). Il cui costo è da 2 a 5 volte maggiore di quello degli acciai normali (per esempio un

Fe 510).

In tendenza con la miniaturizzazione degli impianti di perforazione e quindi anche delle aste, in realtà anche il limite dei 700 MPa sembra essere basso, per cui si rende necessario l'uso di acciai dotati di resistenza ancora maggiore (1100-1200 MPa = ca. 10.800-11.800 kg/cmq).

Tuttavia specificare il carico unitario di rottura di un acciaio non è sufficiente, in quanto occorre che il materiale manifesti una bassa tendenza (se non in prossimità della rottura) a mantenere deformazioni permanenti. Ciò impone quindi che sia alto il limite elastico che molto spesso coincide, per questo genere di acciai, con il limite di snervamento convenzionale (definito come la tensione di lavoro del materiale a cui si verifica uno scostamento della proporzionalità tra forze e deformazioni pari allo 0.2%).

Purtroppo non tutti i produttori di aste di perforazione sono sensibili a questi argomenti, così come non tutti gli utilizzatori, col risultato di scegliere materiali non adatti e quindi fornire aste con caratteristiche intrinseche non sufficienti per la buona riuscita di un lavoro.

4. Dimensioni delle aste di perforazione.

Le aste di perforazione per directional drilling hanno dimensioni variabili in funzione delle forze che esse devono poter trasferire ed in funzione delle inflessioni che devono altresì poter consentire.

Il diametro esterno di un'asta di perforazione (parte tubolare) può variare da 25 a 140 mm e oltre, con spessori della parete del tubo che possano andare dai 4 ai 10-12 mm.

La lunghezza varia a seconda del tipo di perforatrice utilizzata, con escursioni dai 400 ai 6000 mm (e oltre, sino a 12 m, per applicazioni particolari)

I diametri più comuni sono 38, 48, 60, 76, 90 mm, con spessori comuni pari a 4, 6.5, 8 mm, mentre le lunghezze variano da 600 a 3000 mm.

Per le filettature non esiste alcuna standardizzazione (come invece avviene nel settore petrolifero e di riflesso nella ricerca d'acqua o nella geognostica) per questo esistono svariati tipi di filettature, in genere differenti da produttore a produttore.

5. Tecniche di fabbricazione ed assemblaggio.

Come già detto all'inizio di questa relazione, le aste di perforazione possono non essere costruite da un pezzo unico che, se può evocare l'idea di una maggiore resistenza (data la monoliticità), in realtà non consente di ottenere le prestazioni meccaniche ed idrauliche che è possibile invece ottenere con aste assemblate.

Una asta forged one piece si ottiene a partire da un tubo in acciaio a sezione costante che viene ricalcato (forgiatura) alle estremità (da qui il nome di aste forgiate), in modo da ottenere due ringrossi sufficienti per poter ricavare (per tornitura) le filettature di estremità.

Questo impone che le lavorazioni meccaniche vengano effettuate ponendo in lavorazione l'intera asta. Oltretutto ciò impedisce di effettuare (a condizioni economiche che non risultino proibitive) opportuni trattamenti di indurimento superficiale ed antigrippaggio sulle filettature.

In genere per queste applicazioni si ricorre all'uso di acciai al Mn con resistenze alla trazione nell'ordine dei 750 MPa.

Il costo di queste aste è molto elevato perché alti sono in genere i costi delle lavorazioni.

Le prestazioni non sono invece proporzionali al prezzo.

Inoltre dal punto di vista idraulico queste aste presentano condotti di passaggio interno dei fluidi per la perforazione, poco controllati nella forma e nella rugosità della superficie interna.

Questo genera nel fluido di circolazione, perforazione o potenza delle consistenti perdite di energia che

quindi non si rende completamente disponibile per l'uso a cui essa è destinata. Queste perdite, tradotte in minore velocità del fluido di perforazione o circolazione, o in minore energia del fluido di potenza, causano minori rendimenti nella perforazione e negli impianti di alimentazione del fluido, generando un costo di produzione maggiore.

Le aste assemblate saldando i manicotti filettati al tubo, presentano invece (salvo distinguere tra differenti tecniche di assemblaggio) degli indubbi vantaggi rispetto alle aste forgiate, rappresentate dal fatto di poter effettuare lavorazioni e trattamenti che non è possibile effettuare su un'asta forged one piece, e che conferiscono all'asta caratteristiche superiori, permettendo nel contempo di poter mantenere bassi i costi di produzione e quindi i prezzi di vendita.

In particolare risulta possibile lavorare al tornio sia gli esterni che gli interni dei manicotti filettati ottenendo condotti interni, per il passaggio dei fluidi per la perforazione, di forma e scabrezza idraulicamente ottimizzate.

Inoltre i manicotti possono essere sottoposti ad opportuni trattamenti termochimici per il miglioramento della resistenza all'usura e per la riduzione dei fenomeni di grippaggio che, se non opportunamente effettuati, possono causare (come spesso avviene) grandi difficoltà di svitaggio delle aste con conseguente decadimento della produttività di cantiere e quindi del rendimento complessivo del lavoro.

Naturalmente, con le aste assemblate, fondamentali risultano essere le modalità con le quali i manicotti vengono giuntati al tubo.

La giunzione tra manicotto e tubo realizzata per elettrosaldatura (saldatura a filo continuo) ha rappresentato per anni l'unica possibilità tecnologicamente disponibile per realizzare aste assemblate. Purtroppo le caratteristiche intrinseche di questo tipo di saldatura hanno costituito l'anello debole di questo genere di prodotti, che risultavano essere, sotto l'aspetto meccanico, sempre inferiori, per prestazioni, alle aste forgiate.

L'introduzione della saldatura ad attrito, in questo settore applicativo, ha apportato un miglioramento sostanziale delle caratteristiche dei giunti, in quanto consente di realizzare giunti con resistenza pari se non addirittura superiore a quelle del metallo base.

Questa tecnica non necessita di materiali di apporto e, tanto meccanicamente quanto metallurgicamente, rappresenta la tecnica di saldatura oggi più affidabile (ampiamente adoperata per la costruzione di motori aeronautici, componenti aerospaziali, industria automobilistica, militare, ecc.).

Con questa tecnica è inoltre possibile saldare materiali che non risultano saldabili con nessuna altra tecnica. Ciò consente di poter realizzare aste con acciai speciali dotati di caratteristiche di resistenza e resilienza non comuni.

Inoltre nel settore specifico delle aste di perforazione, ed in particolare delle aste da directional drilling, l'introduzione di una innovativa tecnica di saldatura ad attrito ad inglobamento di flash interno (brevetto internazionale di proprietà della Colli Drill S.r.l. e dell'Ing. Renzo Chirulli), ha consentito la fabbricazione di aste di perforazione dotate di altissima resistenza meccanica e di bassa resistenza idraulica interna.

Si tratta di aste di perforazione che si collocano, per qualità e caratteristiche dei materiali impiegati, dei trattamenti termochimici superficiali operati, per disegno delle connessioni filettate, per prestazioni ottenibili in termini di sollecitazioni e curvature, al top della gamma di mercato oggi disponibile per questo genere di applicazioni.

6. Conclusioni.

L'asta di perforazione, lontano dall'essere considerata un mero materiale di consumo, è alla base del principio di funzionamento stesso del directional drilling. L'attenzione verso le condizioni d'uso può aiutare ad ottenere migliori prestazioni meccaniche delle aste e quindi, in generale, di tutto l'impianto di perforazione.

L'uso di materiali e di tecniche di assemblaggio speciali conferiscono alle aste di perforazione caratteristiche fino a pochi anni fa impensabili, che, elevando le prestazioni degli impianti di perforazione, contribuiscono in misura significativa all'affermazione ed al successo del directional

drilling.

Bibliografia

Chiesa G. - *“Pozzi per acqua”* - Hoepli, Milano - 1986

Chirulli R. - *“La saldatura ad attrito nella fabbricazione di aste di perforazione per applicazioni nelle opere di ingegneria civile”* - Quarry and Construction - Edizioni PEI - ITALIA - Marzo 1996.

Chirulli R., Dassisti M., Galantucci L. - *“Aste di perforazione frizionate, caratteristiche meccaniche e geometriche delle giunzioni realizzate con tecnica di saldatura ad attrito”* - Quarry and Construction - Edizioni PEI - ITALIA - Settembre 1996.

Chirulli R. - *“New Generation Friction Welded Drill Pipe”* - No-Dig International Vol.8, no. 7 - Mining Journal Ltd. - London - July 1997.

Chirulli R. - *“Aste di perforazione frizionate ad alta resistenza meccanica e bassa resistenza idraulica interna”* - Quarry and Construction - Edizioni PEI - Parma - Luglio 1997.

Chirulli R. - *“Drill Pipe Advances”* - No-Dig International Vol.9, no. 2 - Mining Journal Ltd. - London - February 1998.

Idelchik I.E. - *“Handbook of hydraulic resistance”* - CRC Press Inc. - Begell House - 1994.

Rajamani G.P., Shunmugam M.S., Rao K.P. - *“Parameter optimization and properties of friction welded quenched and tempered steel”* - Welding Journal 71, June 1992.